יגאל לבנט

ספר הכנה לבגרות

פיזיקה

5-3 יחידות לימוד

אופטיקה וגלים

הוצאת סברן - ספרי לימוד
סברן

הוקלד בעזרת מעבד תמלילים "אורן"

עצוב עטיפה:
אלבס את אלבס בע"מ
רח. נורדאו, 27, חיפה
טל. 04-664747, 04-677299

הודפס באופסט רמז בע"מ
רחוב אינטרנציונל 3, חיפה
טל. 04-8229696

מבוא

הספר שבידך הוא ספר שני בסדרה "פיזיקה: ספרי הכנה לבגרות", והוא מיועד לכל אלה הלומדים פיזיקה ברמה של 3 או 5 יחידות לימוד ואשר מתכוננים לבחינת בגרות בפיזיקה באחת הרמות הללו. בדומה לספר הקודם הדן בנושא "אלקטרומגנטיות", הספר מכיל אוסף ממצה של משימות (סדרות תרגילים לעבודה בכיתה או באופן עצמאי), שיעודן לבחון את ידע התלמידים ולהכינם לבחינת הבגרות בכל היבטים המרכזיים של הפרק "אופטיקה וגלים".

בכל משימה (סדרה) מספר תרגילים אשר על התלמיד לפתור זה אחרי זה על מנת להשלים את המשימה. לכל סדרה בין 5 ל-8 גירסאות הנבדלות בנתונים ההתחלתיים, וכתוצאה מכך, במידת הקושי שבהתרתם. הגירסאות האחרונות בסדרה הן, בדרך כלל, קשות יותר.

לכל סדרה מצורפים:

א) מושגים, נוסחאות וחוקים עיקריים בנושא הסדרה.

ב) דוגמא טיפוסית פתורה פתרון מלא.

ג) תשובות לתרגילים המרכיבים את הסדרה.

על התלמידים, שמתכוננים לבחינת הבגרות ברמה של 3 יחידות לימוד, לבצע רק חלק מהשאלות שבכל סדרה (דהיינו, לענות על השאלות שמופיעות לפני קו ההפרדה).

המחבר מודה לעורך הספר מטעם הוצאת "סברן", שהערותיו תרמו רבות לשיפור תוכן הספר ועיצובו.

לבנט יגאל

תשנ"ו

תוכן העניינים

אופטיקה גיאומטרית.

גלים. אופטיקה פיזיקלית.

* הסדרה מיועדת לתלמידים, המתכוננים למבחן בגרות ברמה של 5 יח"ל

1. התפשטות האור. החזרת האור. מראה מישורית.

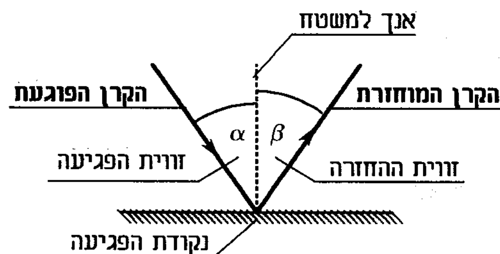
מושגים ונוסחאות עיקריים.

אופטיקה גיאומטרית - פרק באופטיקה, העוסק בחוקי התפשטות, החזרה ושבירת האור תוך התעלמות ממבנה האור.

קרן אור - קו ישר, שלאורכו מתפשטת אנרגיית האור.

מקור אור נקודתי - מקור האור שמידותיו זניחות.

החזרת האור - תופעה, בה האור שמגיע למשטח מוחזר ממנו.



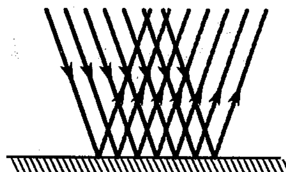
חוקי ההחזרה:

א. הקרן הפוגעת, הקרן המוחזרת והאנך למשטח בנקודת הפגיעה, נמצאים במישור אחד.

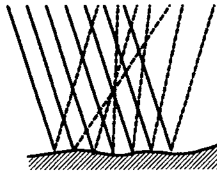
ב. זווית הפגיעה α שווה לזווית ההחזרה β.

$$\alpha = \beta \qquad (1)$$

החזרה מסודרת - החזרה, שבה אלומת קרניים מקבילות מוחזרת בצורת אלומת קרניים מקבילות:

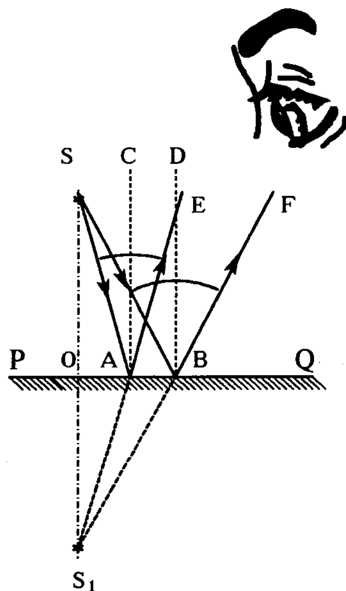


החזרה מפוזרת - החזרה, שבה אלומת קרניים מקבילות מוחזרת בצורת אלומת קרניים לא בהכרח מקבילות:



מראה מישורית - משטח מישורי היוצר החזרה מסודרת.

בניית דמות במראה מישורית



S - נקודה מאירה (מקור אור נקודתי)

PQ - מראה מישורית

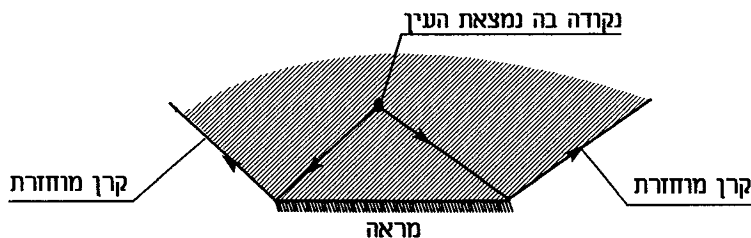
SA ,SB - קרניים פוגעות

AE ,BF - קרניים מוחזרות

AS_1 ,BS_1 -המשכי הקרניים המוחזרות

S_1 - דמות מדומה של נקודה S (נקודה שסימטרית ל-S ביחס ל-PQ, ז"א $SS_1 \perp PQ$, $SO=OS_1$)

שדה הראיה במראה מישורית -אזור המשתקף במראה לעין (אזור המקווקו).



בעיה

באיור 1 נתונים מיקומן של שתי סיכות A ו-B ודמותה A_1 של הסיכה A במראה מישורית.

שרטוט של המראה אינו מופיע באיור.

שאלות

1. שחזר את שרטוט המראה, ובנה את דמותה של הסיכה B.
2. היכן צריך למקם את העין, כדי שהדמויות של הסיכות תתלכדנה? כיצד יראה הצופה מיקום הדדי של הסיכות במצבים שונים של עינו?
3. קבע את האזור, בו יש למקם את העין, כדי לראות את שתי הסיכות בו-זמנית.
4. מורידים את הסיכה B. הסיכה A מתחילה לנוע במהירות v, שגודלה וכיוונה נתונים באיור 2. קבע את גודל מהירות הדמות ביחס ל- א) מראה. ב) גוף (סיכה).

---

5. הסיכה A והמראה נעות במהירויות v ו-u בהתאמה (גודלן וכיוונן של המהירויות מובאות באיור 3). קבע את גודל מהירות הדמות ביחס לקרקע.

6. **מסובבים את המראה סביב נקודה O (ראה איור 4) במהירות זוויתית ω. מהי צורת המסלול של הדמות ומהי מהירותה ?**

7. **מוסיפים עוד מראה היוצרת זווית α עם המראה הראשונה. (ראה איור 5). קבע את זווית הסטייה בין הקרן היוצאת מנקודה A ופוגעת באחת מהמראות ובין הקרן המוחזרת משתי המראות.**

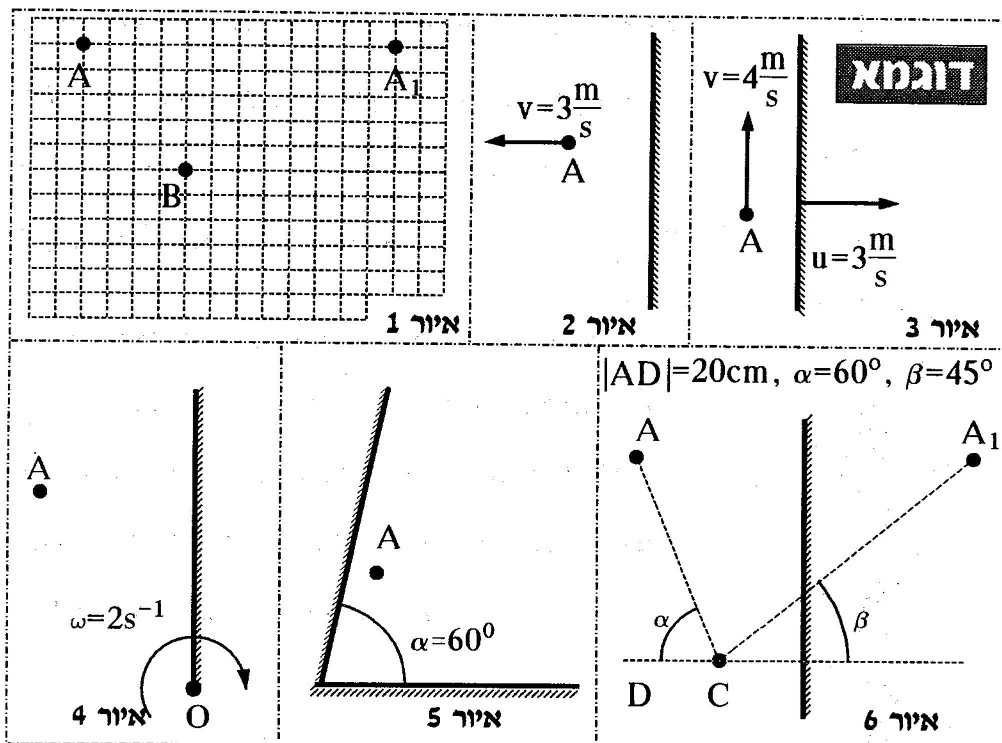
8. **קבע את מספר הדמויות הנוצרות על ידי שתי המראות (איור 5). שרטט את כל הדמויות.**

9. **מנקודה C רואים את הסיכה A בזווית α ואת דמותה במראה בזווית β (ראה איור 6). חשב את מרחק הנקודה C מהמראה.**

10. **ממקמים את העין בנקודה B (ראה איור 1) ואת הסיכה בנקודה A. מכסים את המראה בנייר לא שקוף. באיזה מרחק מקצה המראה (הקצה התחתון של הרשת) יש לחורר את הנייר, כדי לראות את הדמות של הסיכה במראה? (אורך הצלע של משבצת אחת באיור 1 הוא 1cm).**

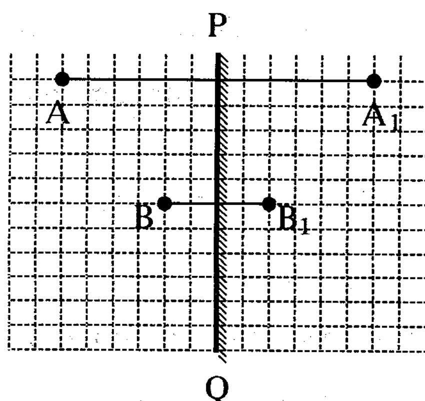
לרוב, החישובים בספר זה מתבצעים עם דיוק של 0.01 . לעתים, מעוגלות התוצאות לסיפרה אחת אחרי הנקודה העשרונית.

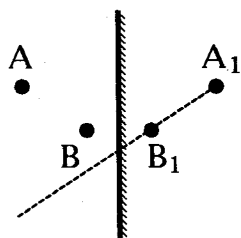
דוגמא



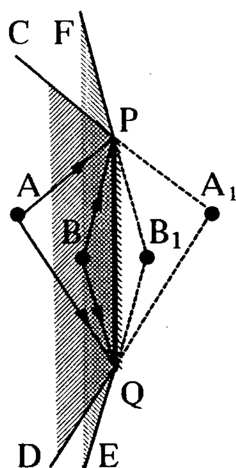
פתרון

1. את מיקום המראה ניתן לשחזר על פי התכונות הגיאומטריות של גוף ודמותו במראה מישורית. לשם כך, יש לחבר את הנקודות A ו-A_1 (המצביעות על מיקומן של הסיכה ודמותה) ולבנות אנך PQ דרך אמצע הקטע AA_1. PQ מתאר את מיקום המראה. למציאת הדמות של B, צריך לאתר את הנקודה B_1 שסימטרית ל-B ביחס למראה PQ.



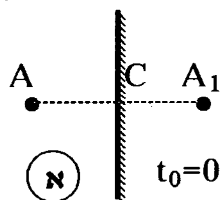


2. לעין, הנמצאת על הקו A_1B_1, הדמויות של שתי הסיכות יתלכדו. לעין הנמצאת מתחת לקו A_1B_1, הדמות B_1 תיראה מצד שמאל לדמות A_1, ולעין הנמצאת מעל הקו הנ"ל, הדמות B_1 תיראה מצד ימין לדמות A_1.

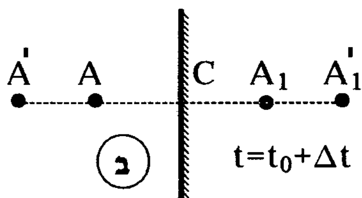


3. כדי לראות דמות של גוף במראה מישורית, אלומת הקרניים היוצאת מהגוף ומוחזרות על ידי המראה צריכה לכלול קרניים, הנכנסות לעין של הצופה. העין הנמצאת באזור FPC או באזור EQD תראה רק את דמות B_1, והעין הנמצאת באזור DQPC תיראה בו-זמנית את שתי הדמויות.

4. באיור "א" מתואר מצב הדדי של הסיכה A, דמותה והמראה עצמה ברגע $t_0=0$.



לאחר זמן Δt, הסיכה תעבור לנקודה A' ודמותה - לנקודה A'_1. המרחק, שעוברת הסיכה ניתן לחישוב לפי הנוסחה $S=|AA'|=\upsilon\Delta t$. שינוי במרחק של הדמות ביחס לסיכה הוא:



$$\Delta S=|A'A'_1|-|AA_1|=2|AA'|=2\upsilon\Delta t$$

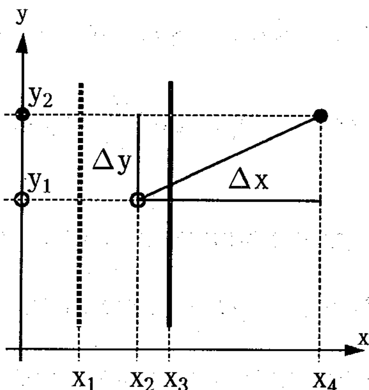
שינוי במרחק של הדמות ביחס למראה שווה ל: $\Delta S_1=|A_1A'_1|=\upsilon\Delta t$.

מכאן מהירות הדמות ביחס לסיכה היא:

$$u = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{2\upsilon\Delta t}{\Delta t} = 2\upsilon = 6\frac{m}{s}$$

מהירות הדמות ביחס למראה היא:

$$u_1 = \frac{\Delta S_1}{\Delta t} = \frac{\upsilon\Delta t}{\Delta t} = \upsilon = 3\frac{m}{s}$$



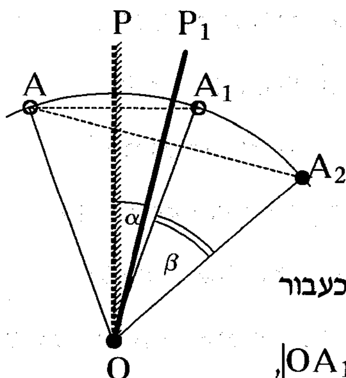
5. באיור מתוארים מצבי הסיכה, דמותה והמראה ברגעים $t_o=0$ ו- $t=t_0+\Delta t$. מהירות הדמות תחושב לפי הנוסחה: $\upsilon_r = \sqrt{\upsilon_x^2+\upsilon_y^2}$ בה υ_x, υ_y הן מהירויות הדמות ביחס לצירים Oy ו-Ox.

מאחר ו- $\upsilon_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$, $\upsilon_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, ו-

$$\Delta x = x_4 - x_2 = 2(x_1 + u\Delta t) - 2x_1 = 2u\Delta t$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 = (y_1 + \upsilon\Delta t) - y_1 = \upsilon\Delta t$$

נקבל את מהירות הדמות: $v_r = \sqrt{\upsilon^2+4u^2} = 7.21\frac{m}{s}$.

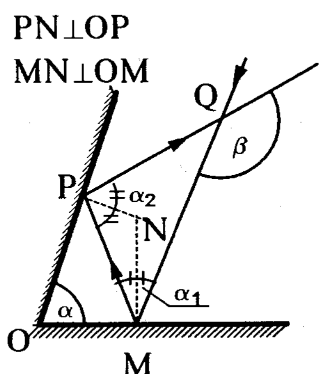


6. נתבונן במיקומן של המראה ודמותה של הסיכה במראה לאחר פרק זמן Δt, שבמהלכו הסתובבה המראה בזווית $\alpha=\omega\Delta t$, והדמות באותו זמן הסתובבה בזווית β.

על פי התכונות הגיאומטריות של הדמות במראה, $|OA|=|OA_1|$ במצב התחלתי $(t_0=0)$ ו- $|OA|=|OA_2|$ כעבור פרק זמן Δt. שני שיוויונות האחרונים גוררים: $|OA_1| = |OA_2|$,

אשר מראה שמרחק הדמות מקצה המראה (נקודה O) נשאר קבוע לאורך זמן, ושמסלול הדמות נמצא על מעגל.

כעת נעיין בזוויות שוות: A_1AA_2 ו-POP_1. הזווית $\angle A_1AA_2$ היא זווית היקפית הנשענת על הקשת A_1A_2, והזווית $\angle A_1OA_2$ היא הזווית המרכזית הנשענת על אותה קשת. מכאן $\beta=2\alpha=2\omega\Delta t$. בחישוב המהירות הזוויתית של הדמות נעזר בנוסחה $\omega_1=\frac{\beta}{\Delta t}$ ונקבל: $\omega_1=\frac{2\omega\Delta t}{\Delta t}=2\omega=4s^{-1}$.



7. בהתאם לחוק החזרת האור, זווית הפגיעה שווה לזווית ההחזרה. במקרה הנדון: $\angle QMP=2\alpha_1$ ו- $\angle QPM=2\alpha_2$.

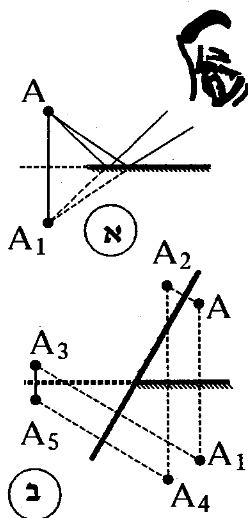
הזווית β היא זווית חיצונית למשולש MPQ ולכן

$$\beta = 2\alpha_1+2\alpha_2 = 2(\alpha_1+\alpha_2)$$

מהמרובע OMNP: $\alpha + \angle MNP = 180^0$.

מהמשולש MNP: $\alpha_1 + \alpha_2 + \angle MNP = 180^0$.

השיוויונות האחרונים גוררים: $\beta = 2\alpha = 120^0$.

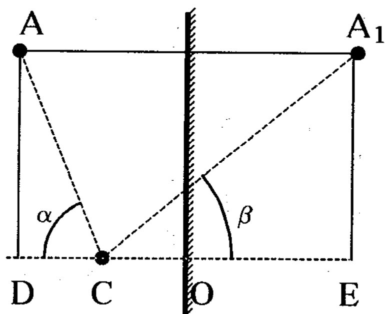


8. כאן חשוב להבליט שתי עובדות:

א) הדמות המתקבלת במראה אחת משמשת בתור גוף למראה שניה.

ב) יש להתיחס לא רק למראה עצמה, אלא גם להמשך הדמיוני שלה (ראה איור "א").

תשובה לשאלה מובאת באיור "ב".



9. המרחק $|CO|$ ממראה לנקודה C הוא:

$|CO| = |DO| - |DC|$. מהתכונות הגיאומטריות

של גוף ודמותו נובע, כי $|DO| = |OE| = \frac{1}{2}|DE|$.

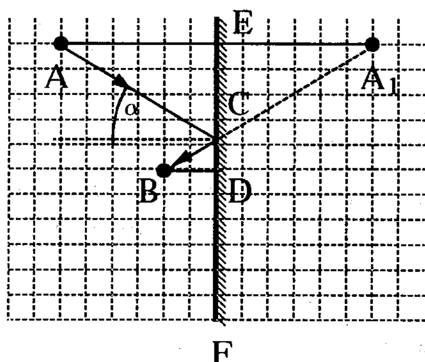
התבוננות במשולשים CDA ו- A_1EC גוררת:

$|DC| = |AD| \bullet \cot\alpha$, $|CE| = |AD| \bullet \cot\beta$,

$|DE| = |DC| + |CE| = |AD| \bullet \cot\alpha + |AD| \bullet \cot\beta = |AD| \bullet (\cot\alpha + \cot\beta)$.

נציב את הביטוים עבור $|DO|$ ועבור $|DC|$ בביטוי עבור $|CO|$ ונקבל:

$$|CO| = \frac{1}{2}|AD| \bullet (\cot\beta - \cot\alpha) = 4.23\text{cm}$$

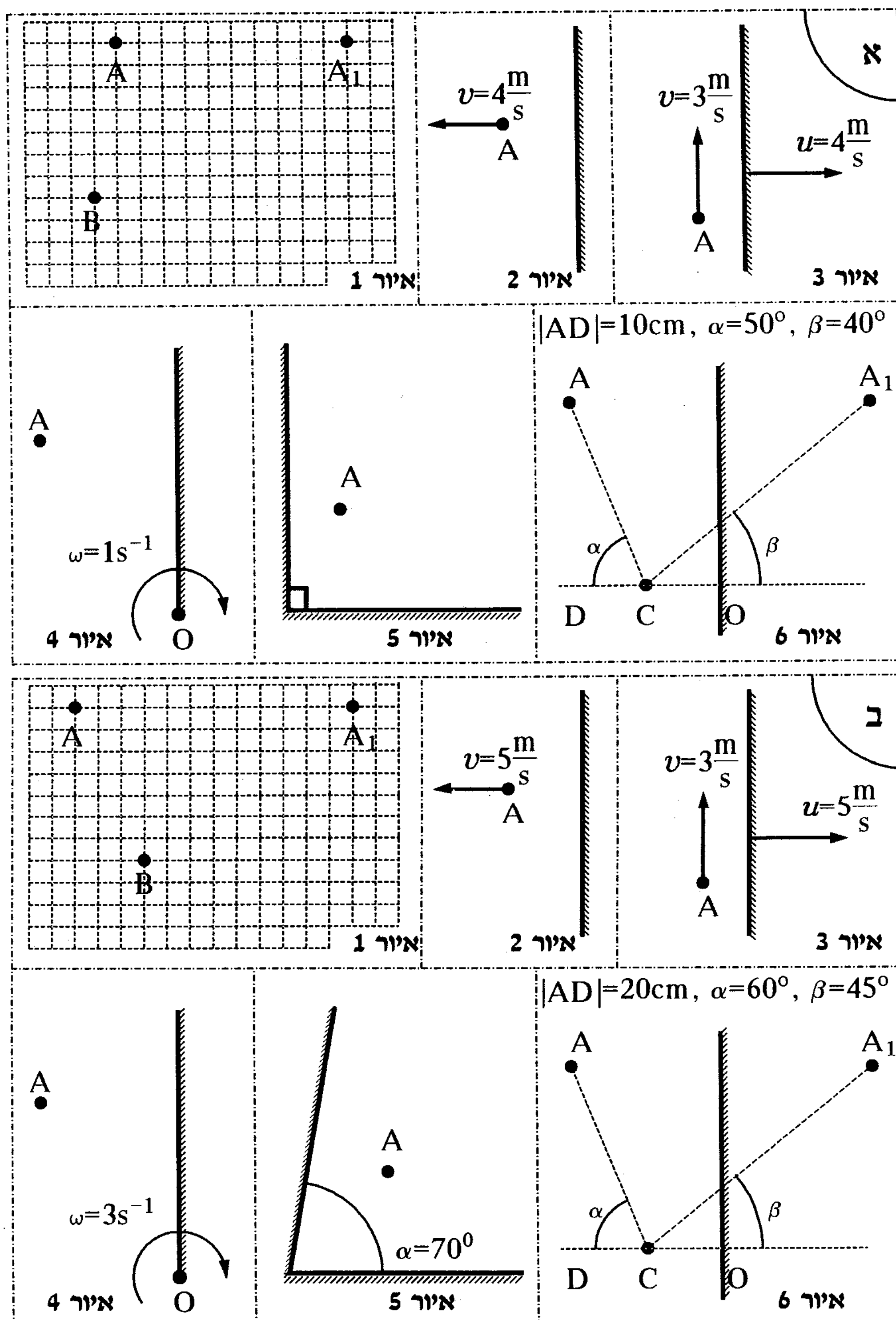


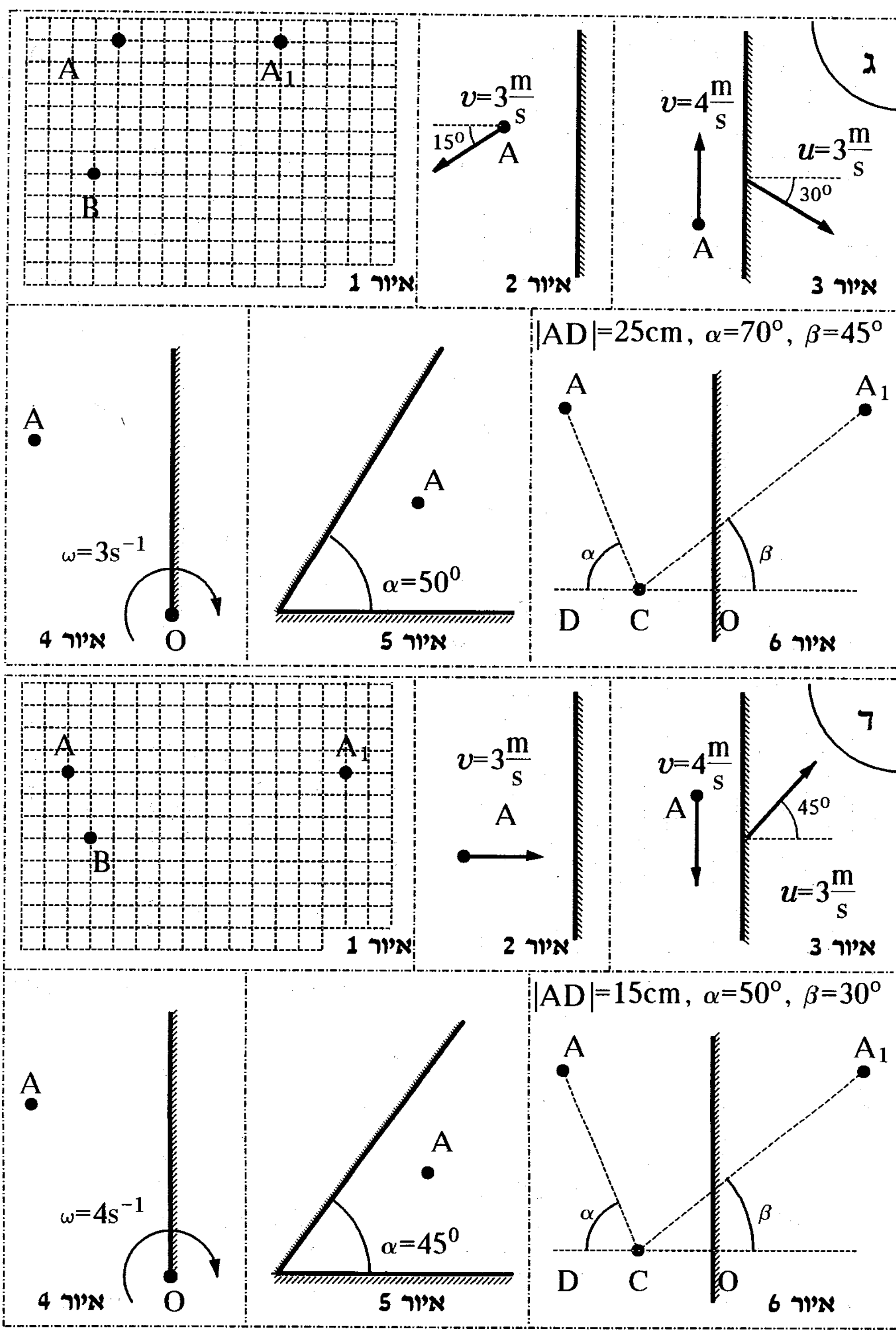
10. מהלך הקרן, היוצאת מנקודה A והעוברת, לאחר החזרה מהמראה, דרך נקודה B, מובא באיור משמאל. הנקודה C היא נקודה, בה יש לחורר את הנייר, כדי לראות את הדמות A_1 במראה מנקודה B. לחישב המרחק $|CF|$ נתבונן במשולשים CEA ו- BDC. מהמשולש הראשון מקבלים: $|CE| = |AE| \bullet \tan\alpha$, מהמשולש השני: $|CD| = |BD| \bullet \tan\alpha$.

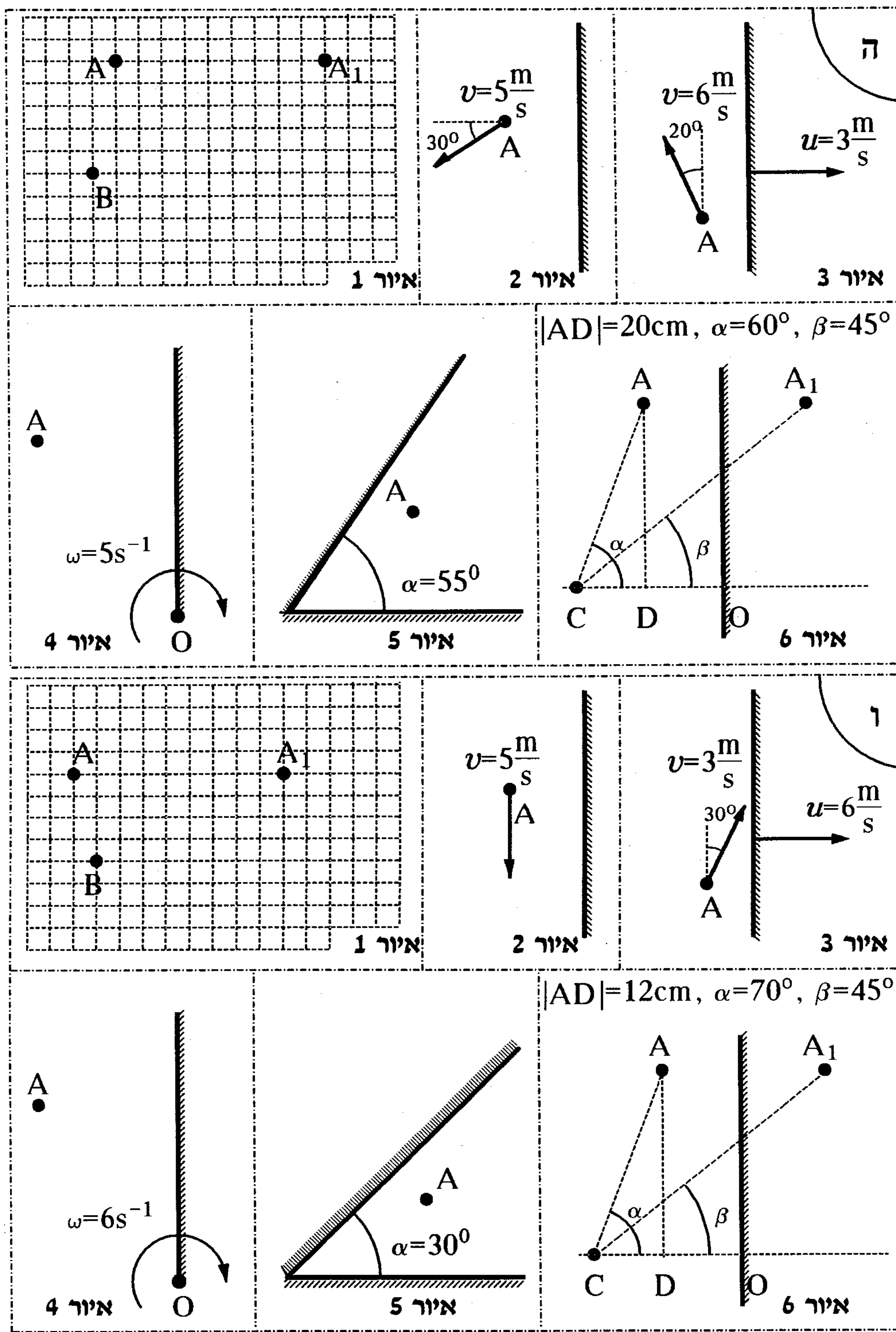
מהביטויים עבור $|CE|$ ו-$|CD|$ ומהעובדה ש: $|CE| = |DE| - |DC|$ נובע:

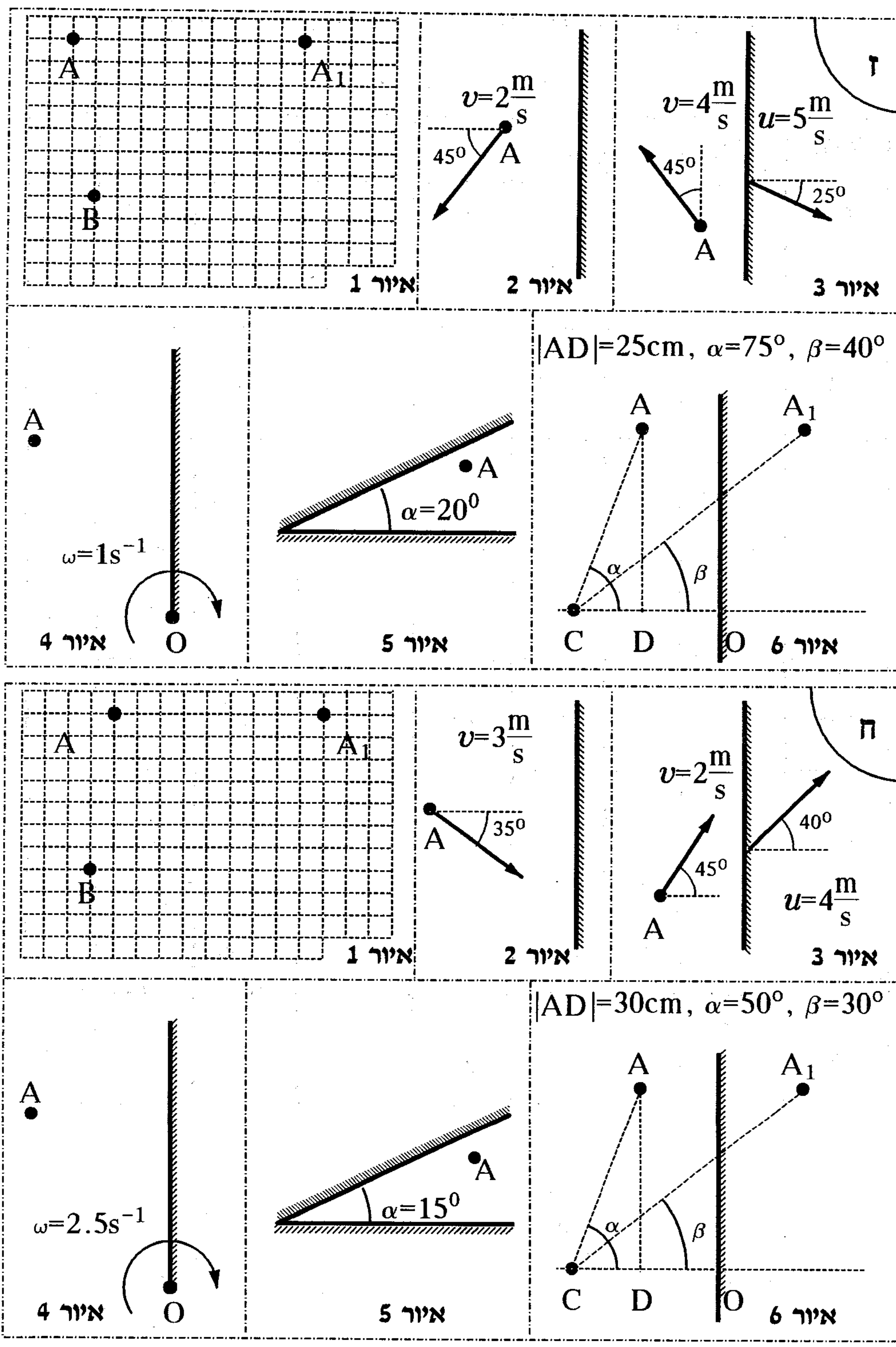
$$|CD| = \frac{|BD||DE|}{|BD| + |AE|} = \frac{2\text{cm} \bullet 5\text{cm}}{2\text{cm} + 6\text{cm}} = 1.25\text{cm}$$

המרחק קצה המראה מנקודה C הוא איפא 7.25cm .


א
A
A_1
B
איור 1
$v=4\frac{m}{s}$
A
איור 2
$v=3\frac{m}{s}$
$u=4\frac{m}{s}$
A
איור 3
A
$\omega=1s^{-1}$
O
איור 4
A
איור 5
$|AD|=10cm,\ \alpha=50^\circ,\ \beta=40^\circ$
A
A_1
α
β
D
C
O
איור 6
ב
A
A_1
B
איור 1
$v=5\frac{m}{s}$
A
איור 2
$v=3\frac{m}{s}$
$u=5\frac{m}{s}$
A
איור 3
A
$\omega=3s^{-1}$
O
איור 4
A
$\alpha=70^0$
איור 5
$|AD|=20cm,\ \alpha=60^\circ,\ \beta=45^\circ$
A
A_1
α
β
D
C
O
איור 6


ג
A
A1
B
איור 1
$v=3\frac{m}{s}$
15°
A
איור 2
$v=4\frac{m}{s}$
$u=3\frac{m}{s}$
30°
A
איור 3
A
$\omega=3s^{-1}$
O
איור 4
A
$\alpha=50^0$
איור 5
$|AD|=25cm,\ \alpha=70^o,\ \beta=45^o$
A
A1
α
β
D
C
O
איור 6
ד
A
A1
B
איור 1
$v=3\frac{m}{s}$
A
איור 2
$v=4\frac{m}{s}$
A
45°
$u=3\frac{m}{s}$
איור 3
A
$\omega=4s^{-1}$
O
איור 4
A
$\alpha=45^0$
איור 5
$|AD|=15cm,\ \alpha=50^o,\ \beta=30^o$
A
A1
α
β
D
C
O
איור 6


ה
A
A1
B
איור 1
v=5 m/s
30°
A
איור 2
v=6 m/s
20°
u=3 m/s
A
איור 3
A
ω=5s⁻¹
O
איור 4
A
α=55°
איור 5
|AD|=20cm, α=60°, β=45°
A
A1
α
β
C
D
O
איור 6
ו
A
A1
B
איור 1
v=5 m/s
A
איור 2
v=3 m/s
30°
u=6 m/s
A
איור 3
A
ω=6s⁻¹
O
איור 4
A
α=30°
איור 5
|AD|=12cm, α=70°, β=45°
A
A1
α
β
C
D
O
איור 6



ז
A
A_1
B
איור 1
$v=2\frac{m}{s}$
45^0
A
איור 2
$v=4\frac{m}{s}$
$u=5\frac{m}{s}$
45^0
25^0
A
איור 3
A
$\omega=1s^{-1}$
O
איור 4
A
$\alpha=20^0$
איור 5
$|AD|=25cm,\ \alpha=75^o,\ \beta=40^o$
A
A_1
α
β
C
D
O
איור 6
ח
A
A_1
B
איור 1
$v=3\frac{m}{s}$
35^0
A
איור 2
$v=2\frac{m}{s}$
40^0
45^0
$u=4\frac{m}{s}$
A
איור 3
A
$\omega=2.5s^{-1}$
O
איור 4
A
$\alpha=15^0$
איור 5
$|AD|=30cm,\ \alpha=50^o,\ \beta=30^o$
A
A_1
α
β
C
D
O
איור 6

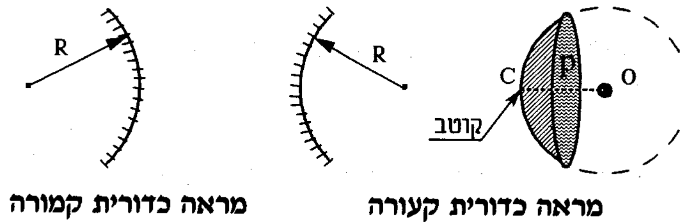
דף תשובות לסדרה "התפשטות האור. החזרת האור.
מראה מישורית"

$\lvert CD\rvert$	$\lvert CO\rvert$	n	β	ω_1	v_r	u	u_1	
cm	cm			s^{-1}	m/s	m/s	m/s	
7.82	1.76	3	180^0	2	8.54	8	4	א
6.33	4.23	5	140^0	6	10.44	10	5	ב
8.38	7.95	7	100^0	6	5.77	5.8	3	ג
6.36	6.70	7	90^0	8	4.64	6	3	ד
7.75	4.23	6	110^0	10	11.57	8.66	5	ה
5.75	3.82	11	60^0	12	9.37	0	5	ו
7.11	11.55	17	40^0	2	14.97	2.82	2	ז
7.85	13.39	23	30^0	5	3.49	4.91	3	ח

.2 החזרת האור. מראות כדוריות.

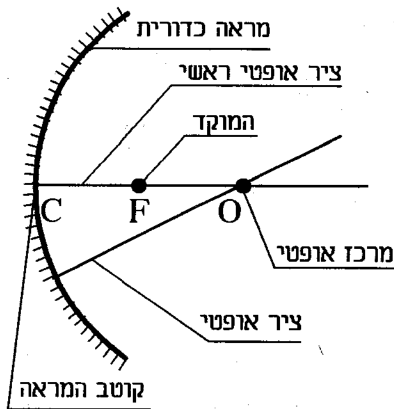
מושגים ונוסחאות עיקריים.

מראה כדורית - חלק של משטח כדורי עליו מתבצעת השתקפות האור.



מראה כדורית קעורה **מראה כדורית קמורה**

מרכז אופטי - מרכז המשטח הכדורי שהמראה היא חלק ממנו.



קוטב המראה הכדורית - נקודה על פני משטח כדורי דרכה עובר אנך מהמרכז האופטי למישור p (ראה איור לעיל).

ציר אופטי של המראה - קו ישר שעובר דרך מרכז אופטי.

ציר אופטי ראשי - ציר אופטי העובר דרך קוטב המראה הכדורית.

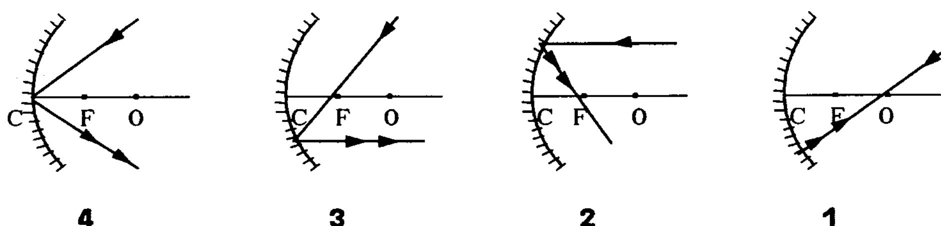
מוקד המראה הכדורית -נקודה בה נפגשות קרניים, המתפשטות במקביל לציר האופטי הראשי, לאחר החזרתן מהמראה.

מרחק המוקד - המרחק המוקד מקוטב המראה.

מישור המוקד - מישור המאונך לציר האופטי הראשי העובר דרך המוקד.

בניית דמות במראה כדורית - לבניית דמות במראה הכדורית משמשות שתיים מתוך ארבע קרניים מיוחדות:

1. קרן המתפשטת לאורך ציר אופטי (מוחזרת מהמראה לאורך אותו ציר אופטי).
2. קרן המתפשטת לאורך ישר המקביל לציר אופטי ראשי (מוחזרת מהמראה דרך המוקד).
3. קרן המתפשטת לאורך ישר העובר דרך המוקד (מוחזרת במקביל לציר אופטי ראשי).
4. קרן המתפשטת לאורך ישר העובר דרך קוטב המראה (מוחזרת סימטרית ביחס לציר אופטי ראשי).



נוסחת המראה הכדורית (1):

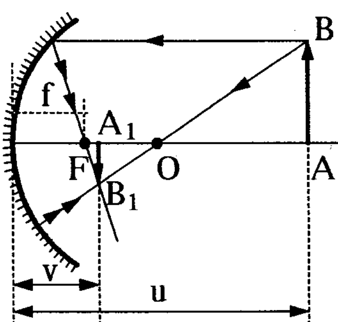
f - מרחק המוקד

u - המרחק הגוף מהמראה

v - המרחק הדמות מהמראה

R - רדיוס המראה.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{2}{R}$$



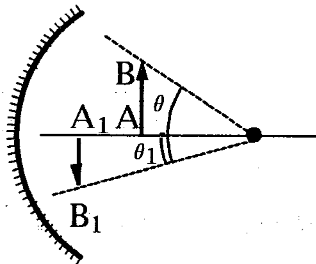
הגדלה קווית של מראה כדורית:

h - גודל הגוף

H - גודל הדמות

$$M = \left|\frac{H}{h}\right| = \left|\frac{v}{u}\right| \qquad (2)$$

הגדלה זוויתית של מראה כדורית:

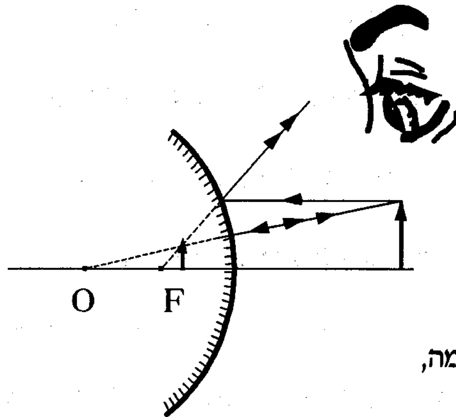


$$K = \frac{\theta_1}{\theta} \qquad (3)$$

θ - זווית שממנה רואים את הגוף

θ_1 - זווית שממנה רואים את הדמות

מראה כדורית קמורה:



בבניית דמות במראה קמורה משמשות אותן קרניים כמו בבניית דמות במראה קעורה.

עם זאת, ישנם הבדלים הבאים:

א) מוקד המראה הקמורה הוא המוקד המדומה (דרכו עוברת לאו דווקא הקרן המוחזרת עצמה, אלא המשכה (ראה איור).

ב) דמות במראה קמורה היא תמיד דמות מדומה (המתקבלת כמפגש המשכי הקרניים ולאו דווקא הקרניים עצמן), ישרה וממוקמת אחרי המראה ולפני המוקד.

ג) לחישובים משמשת נוסחה (1) עם "-" לפני מרחק המוקד.

בעיה באיור 1 מוגדרים מיקום של הגוף AB, דמותו A_1B_1 במראה כדורית והציר האופטי הראשי של המראה. שרטוט של המראה אינו נתון.

שאלות

1. קבע את מיקומם של המרכז האופטי של המראה ואת קוטבה.
2. מצא לפי השרטוט את מרחקי הגוף ודמותו מהמראה, חשב את מרחק המוקד. אורך המשבצת באיור 1 הוא 1 ס"מ.
3. מזיזים את הגוף ב-1 ס"מ לכיוון המראה.

א) חשב את שינוי מרחק הדמות מהמראה.

ב) חשב פי כמה משתנה ההגדלה הקווית.

---

4. גוף AB הנמצא במרכז המראה מתחיל להתקרב במהירות קבועה למראה. התלות של מרחק הדמות מהמראה בזמן נתונה באיור 2.

א) תאר את תנועת הדמות.

ב) קבע את מהירות הגוף AB.

ג) שרטט את הגרף של תלות מהירות הדמות בזמן.

---

5. ממקמים את הגוף הזעיר במרחק a מהמראה הכדורית הנ"ל (ראה איור 3) ומקבלים את דמותו הישרה והמוגדלת. לעין הנמצאת במרכז המראה, הגודל הזוויתי של הדמות גדולה פי K מהגודל הזוויתי של הדמות, המתקבלת במראה מישורית, הנמצאת באותו מרחק a מהגוף.

א) שרטט את מהלכי הקרניים בשני המקרים.

ב) חשב את המרחק a.

6. מקור אור נקודתי S נמצא על הציר האופטי הראשי במרחק d ממנה (ראה איור 4). קבע את המקום, בו יש לשים את המראה המישורית, כדי שהקרניים היוצאות ממקור האור והמוחזרות מהמראה הכדורית, ולאחר מכך, מהמראה מישורית, תפגשנה בנקודה S.

7. ענה על השאלה 6, במקרה, כאשר במקום מראה מישורית מציבים מראה קעורה, שמרחק המוקד שלה הוא 5 ס"מ.

8. כנ"ל, אך במקום מראה מישורית, מציבים מראה קמורה (קבע את מיקום המראה ע"י בנייה בלבד).

דוגמא

פתרון

1. לקביעת מיקומם של המרכז האופטי ושל הקוטב, נעזר בקרניים מיוחדות 2 ו-4. נחבר את הנקודות A ו-A_1. נקודת החיתוך של הישר AA_1 עם ציר האופטי הראשי מתלכדת עם המרכז האופטי.

הישר AA_2 (A_2 סימטרית ל-A_1 ביחס לציר אופטי ראשי) נחתך עם ציר אופטי ראשי בקוטב המראה.

2. הבנייה שבוצעה מראה כי מרחק הגוף מהמראה הוא: $u = |CB| = 6cm$,

והמרחק בין הדמות למראה הוא $v = |CB_1| = 15cm$.

על-פי הנוסחה (1), מרחק המוקד הוא:

$$f = \frac{uv}{u+v} = \frac{6cm \bullet 15cm}{6cm+15cm} = 4.29cm$$

3. השאלה 3א ניתנת להתרה בשני אופנים:

I. **א)** בהתרת השאלה הקודמת נקבע מרחק הגוף מהמראה, שהוא 6cm. הזזת הגוף ב-1 ס"מ לכיוון המראה מביאה למרחק הגוף מהמראה שווה ל-5cm.

נעזר שוב בנוסחה (1), ונחשב את המרחק החדש בין המראה לדמות:

$$v_1 = \frac{fu_1}{u_1-f} = \frac{4.29cm \bullet 5cm}{5cm-4.29cm} = 30.21cm$$

מכאן מרחק בין המראה לדמות השתנה ב: $v_1-v=30.21-15=15.21cm$.

ב) לפי נוסחה (2), ההגדלה הקווית לפני ואחרי הזזה היא:

$$M = \frac{v}{u} = \frac{15cm}{6cm} = 2.5 \quad ,M_1 = \frac{v_1}{u_1} = \frac{30.21cm}{5cm} = 6.04$$

כלומר, ההגדלה הקווית גדלה פי $\frac{M_1}{M} = \frac{6.04}{2.5} = 2.42$

II. **א)** נסמן את תזוזת הגוף ב-x, ונרשום את הנוסחה (1) למצבים לפני ואחרי הזזה:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} ; \qquad \frac{1}{f} = \frac{1}{u-x} + \frac{1}{v_1}$$

מהרשום לעיל מחושב השינוי במרחק הדמות מהמראה:

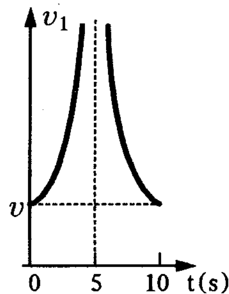
$$v_1 - v = \frac{f^2 x}{(u-x-f)(u-f)} \approx 15.21\text{cm}$$

4. א) הגרף שבאיור 2 מראה כי:

* אם $t=0$, הדמות נמצאת במרחק $2f$ מהמראה.
* עם תנועת הגוף ממרכז המראה למוקד, הדמות הממשית מתרחקת מהמראה, ומהירותה הולכת וגדלה.
* אם הגוף מגיע למוקד לאחר 5 שניות (חשוב לסעיף "ב" להלן!) דמותו נמצאת באינסוף.
* אם ממשיך הגוף להתקרב למראה, הדמות המדומה מתקרבת אל המראה מהצד השני שלה ומהירותה הולכת וקטנה.

ב) סעיף "א" מראה כי לגוף דרושות 5 שניות כדי להגיע ממרכז המראה למוקד. בשאלה 3 חושב מרחק המוקד ולכן נוכל עתה לחשב את מהירות הגוף:

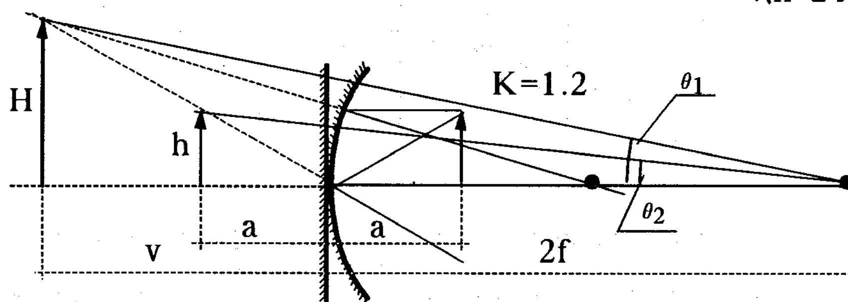
$$\upsilon = \frac{S}{t} = \frac{4.29\text{cm}}{5\text{s}} = 0.86\frac{\text{cm}}{\text{s}}$$



ג) לשרטוט גרף התלות של מהירות הדמות בזמן, נרשום את הנוסחה (1) בצורה: $\frac{1}{v} + \frac{1}{2f-\upsilon t} = \frac{1}{f}$ ונבטא את v: $v = \frac{f(2f-\upsilon t)}{f-\upsilon t}$. למציאת מהירות הדמות, נגזור v בזמן: $\upsilon_1 = v'(t) = \frac{\upsilon f^2}{(f-\upsilon t)^2}$.

גרף התלות הנ"ל מובא משמאל. הגרף מראה כי בזמנים $t=0s$ ו- $t=10s$, מהירות הדמות שווה למהירות הגוף; בפרקי זמן מ-0 ל-5 שניות, מהירות הדמות הולכת וגדלה, ובפרקי זמן מ-5 ל-10 שניות, המהירות קטנה.

5. לפי תנאיי הבעיה, הדמות המתקבלת במראה כדורית היא ישרה ומוגדלת. כלומר, הגוף נמצא בין המראה לבין המוקד. לבניית הדמות במראה כדורית, נשתמש בקרניים מיוחדות 2 ו-4. לבניית הדמות במראה מישורית, נעזר בתכונות הגיאומטריות של הגוף ודמותו במראה מישורית. את תוצאות הבנייה ניתן לראות באיור למטה (הדמות במראה הכדורית מסומנת ב-H, והדמות במראה המישורית מסומנת ב-h):



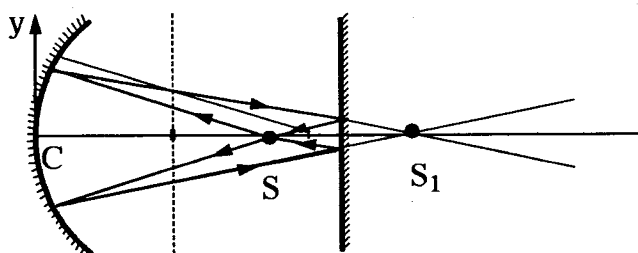
על פי תנאיי הבעיה, הגודל הזוויתי של הדמות H, בהסתכלות מנקודה O גדול פי $K=\frac{\theta_1}{\theta}$ מהגודל הזוויתי של h. מאחר והזוויות קטנות, ניתן לרשום בקירוב:

$$K \approx \frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\frac{H}{v+2f}}{\frac{h}{a+2f}} = \frac{H(a+2f)}{h(v+2f)}$$

מאחר ו- $\frac{H}{h}=\frac{v}{a}$, בביטוי שנתקבל ישנם שני נעלמים a ו-v. נבטא אחד מהם (v) בעזרת הנוסחה (1): $\frac{1}{f}=\frac{1}{a}-\frac{1}{v}$ (הסימן "-" מצביע על כך, שהדמות המתקבלת במראה מדומה). מכאן: $v=\frac{af}{f-a}$. נציב את הביטוי עבור v בביטוי האחרון עבור K, ונקבל את המרחק הנדרש a:

$$a = \frac{2f(k-1)}{k+1} = \frac{2\bullet 4.29cm\bullet(1.2-1)}{1.2+1} = 0.78cm$$

6. נשרטט את מהלך הקרניים במראה כדורית (ראה איור למטה). לבניית דמותו של המקור הנמצא על ציר אופטי ראשי, נשתמש בתכונה הבאה של מראה כדורית: קרניים מקבילות המתפשטות במקביל לציר אופטי כלשהו, מוחזרות דרך נקודת החיתוך של ציר האופטי הנ"ל עם מישור המוקד.



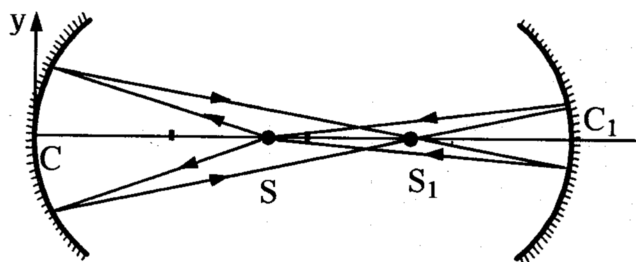
השרטוט לעיל מראה שצריך להציב את המראה המישורית בין מקור האור הנקודתי S לבין הדמות הצפוייה, כי רק במקרה זה המראה המישורית יכולה למקד את הקרניים. הקרניים המוחזרות ממראה מישורית מתרכזות בנקודה S רק אם נקודה זו סימטרית לנקודה S_1 ביחס למראה. מכאן צריך למקם את המראה המישורית במרחק d_1 ממקור האור S_1:

$$d_1 = \frac{|SS_1|}{2} = \frac{|CS_1|-|CS|}{2} = \frac{v-d}{2}$$

מרחק הדמות מהמראה v מתבטא בעזרת נוסחה (1), כאשר המרחק d נקבע על פי איור 4:

$$d_1 = \frac{d(2f-d)}{2(d-f)} = \frac{6cm(2\bullet 4.29cm-6cm)}{2(6cm-4.29cm)} = 4.53cm$$

7. בניית הדמות במראה הכדורית הראשונה זהה לזו, שבשאלה הקודמת. את המראה הכדורית השנייה נציב מאחורי הדמות המתקבלת במראה הראשונה, כדי שהיא תרכז את הקרניים (ראה את השרטוט דלהלן). נסמן את המרחק S_1C_1 של הדמות S_1 מהמראה ב-d_2. המרחק SS_1 ידוע מהשאלה הקודמת: $|SS_1|=2d_1=9.06cm$.



נרשום את הנוסחה (1) במקרה הנדון:

$$\frac{1}{5} = \frac{1}{9.06+d_2} + \frac{1}{d_2}$$

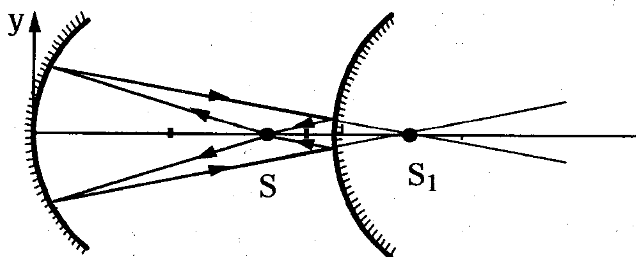
ונקבל את המרחק d_2: $d_2=-6.27cm$ או $d_2=7.22cm$.

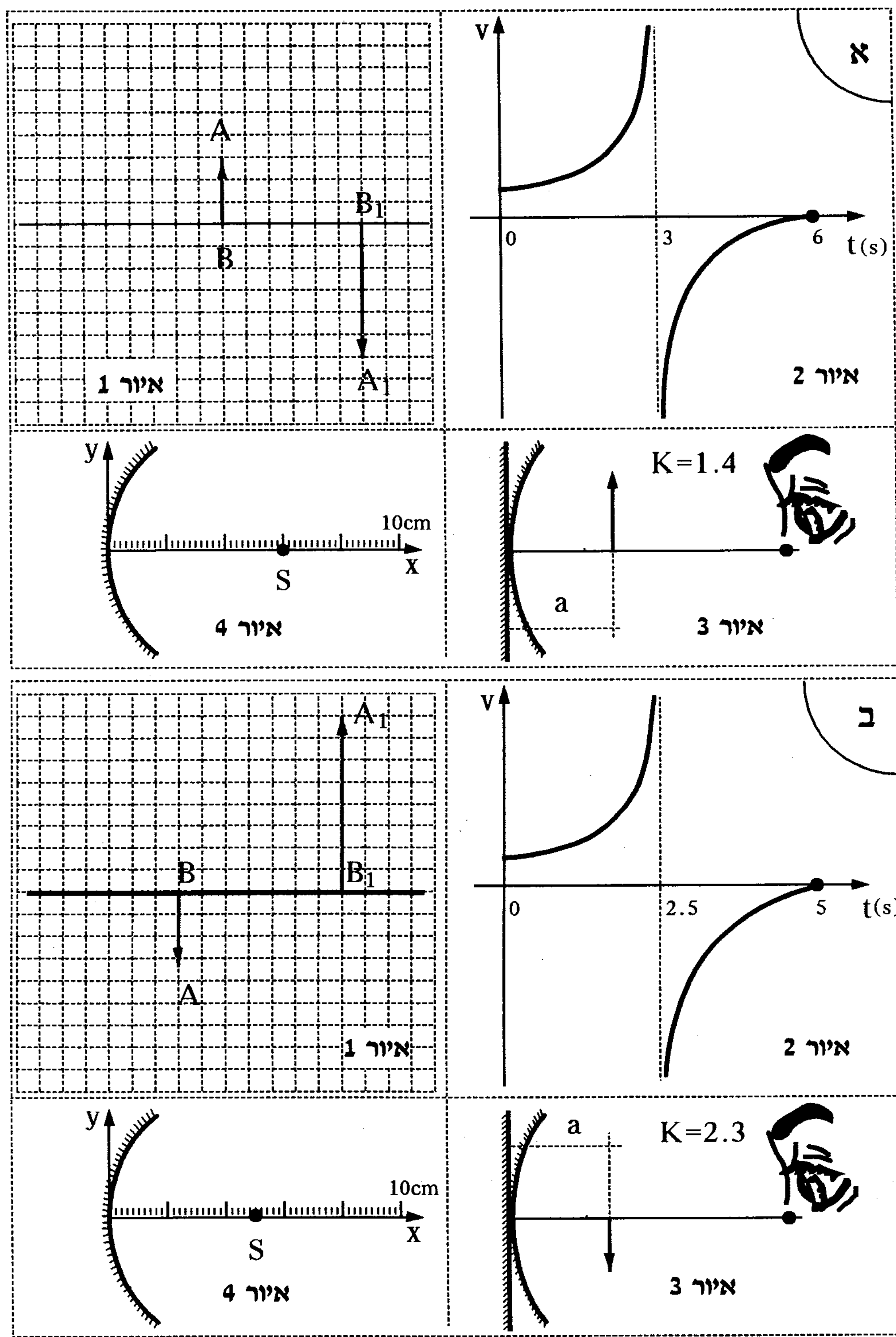
נשאר לקבוע את מיקום אפשרי של המראה ביחס למראה הראשונה:

$L_1 = 7.22+9.06+6 = 22.28cm$ (עבור $d_2=7.22cm$)

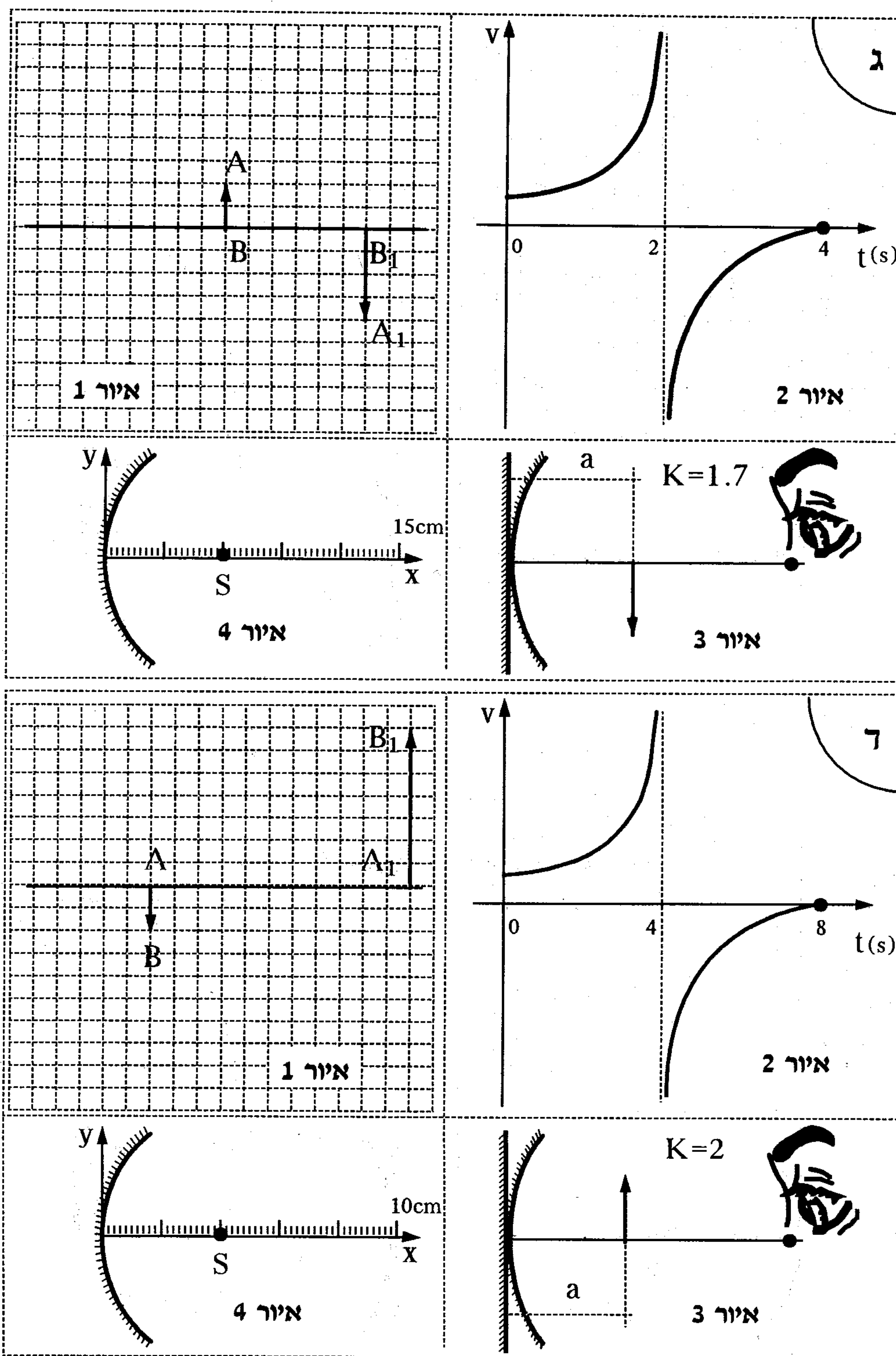
$L_2 = -6.27+9.06+6 = 8.79cm$ (עבור $d_2=-6.27cm$)

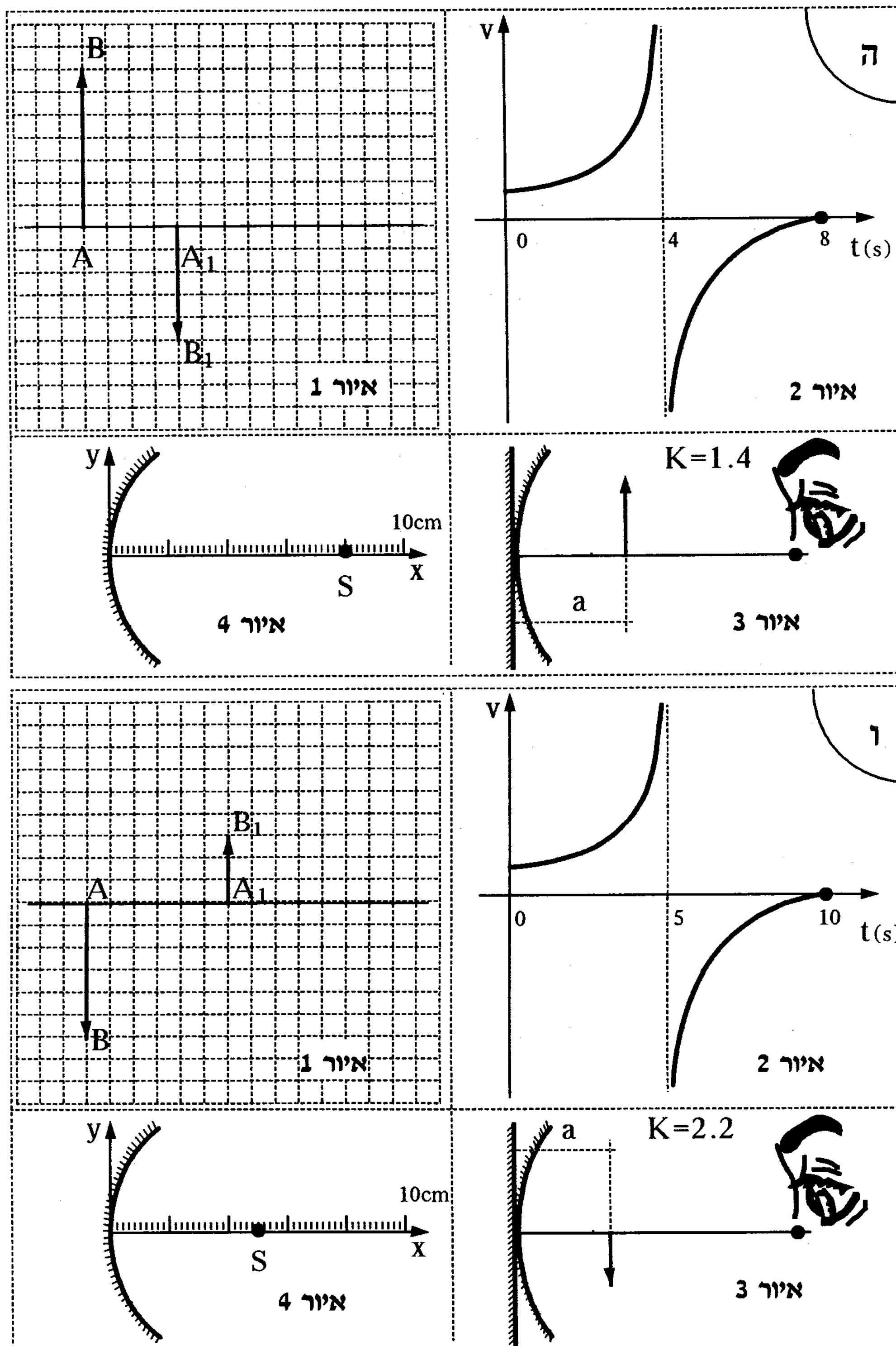
8. בניית הדמות במראה הכדורית הראשונה זהה לזו, שבשאלה 6. השרטוט להלן מראה, שאת המראה הכדורית השנייה צריך למקם לפני הדמות המתקבלת במראה הראשונה, כדי שהמראה השנייה תרכז את הקרניים.





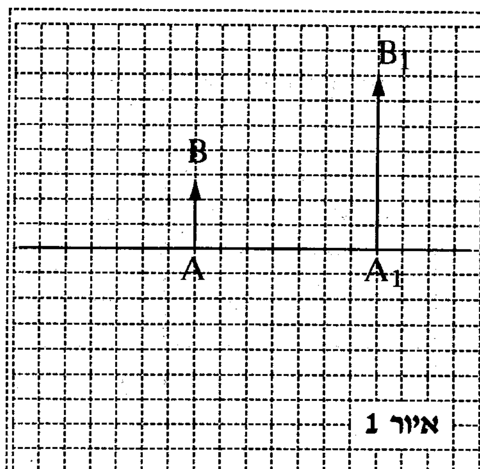
א
A
B
B1
A1
איור 1
v
0
3
6
t(s)
איור 2
y
10cm
S
x
איור 4
K=1.4
a
איור 3
ב
A1
B
B1
A
איור 1
v
0
2.5
5
t(s)
איור 2
y
10cm
S
x
איור 4
a
K=2.3
איור 3


ג
A
B
B_1
A_1
איור 1
v
0
2
4
t(s)
איור 2
y
15cm
S
x
איור 4
a
K=1.7
איור 3
ד
B_1
A
A_1
B
איור 1
v
0
4
8
t(s)
איור 2
y
10cm
S
x
איור 4
K=2
a
איור 3

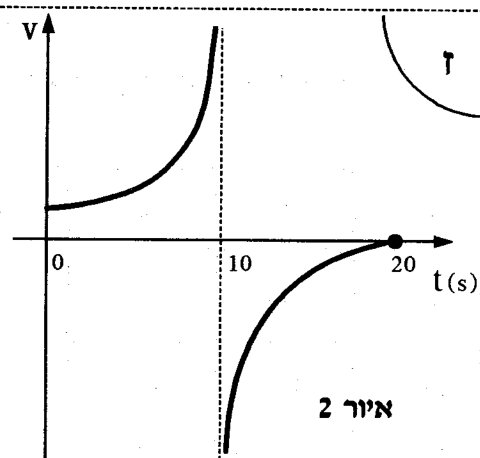


ה
B
A
A_1
B_1
איור 1
v
0
4
8
t(s)
איור 2
y
10cm
x
S
איור 4
K=1.4
a
איור 3
ו
B_1
A
A_1
B
איור 1
v
0
5
10
t(s)
איור 2
y
10cm
x
S
איור 4
a
K=2.2
איור 3

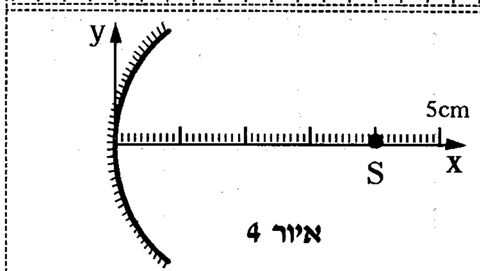
ז



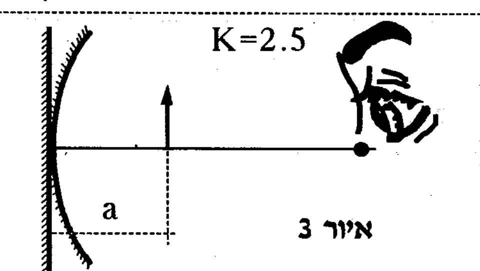
איור 1



איור 2

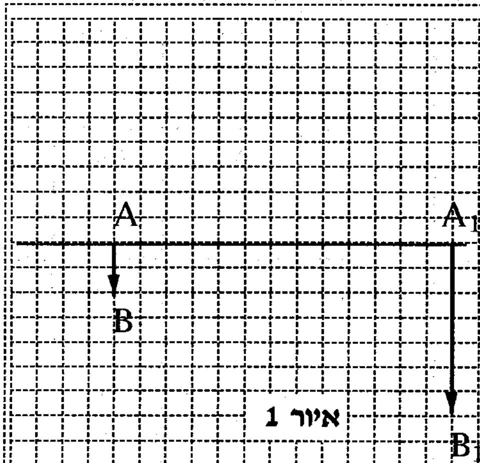


איור 4

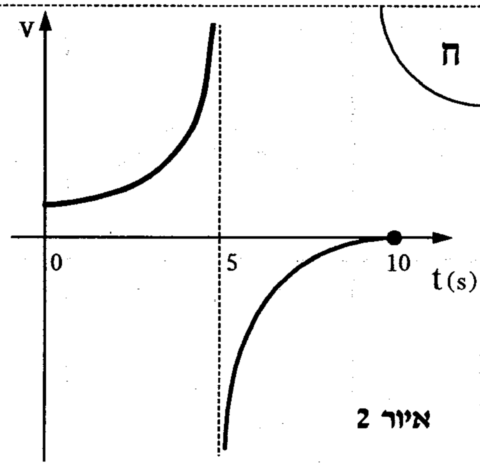


איור 3

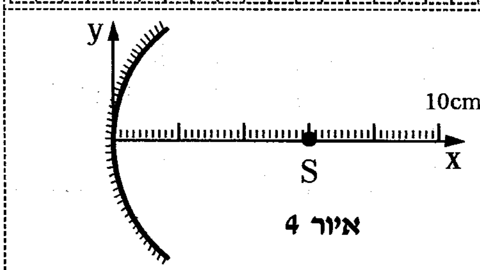
ח



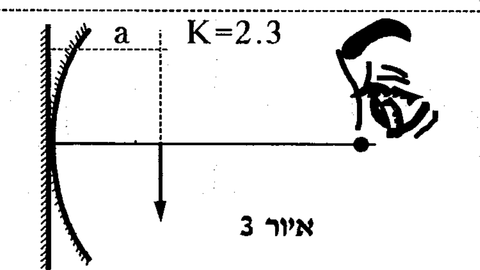
איור 1



איור 2



איור 4



איור 3

דף תשובות לסדרה "החזרת האור. מראות כדוריות"

	f	Δv	M_1/M	v	a	d_1	L
	cm	cm		$\frac{cm}{sec}$	cm	cm	cm
א	4.0	8.0	2.0	1.33	1.33	3.0	19.8 8.17
ב	3.53	18.0	3.13	1.41	2.78	3.5	19.6 7.40
ג	4.0	8.0	2.0	2.0	2.07	3.0	19.8 8.17
ד	3.16	75.0	5.33	0.79	2.11	5.5	21.9 7.0
ה	5.83	0.57	1.15	1.46	1.94	6.75	28.2 11.4
ו	4.0	0.29	1.14	0.80	3.0	7.5	26.5 8.50
ז	3.33	3.57	0.57	0.33	2.85	7.94	26.3 7.56
ח	4.29	6.25	0.56	0.86	3.38	4.53	22.27 8.78

3. שבירת האור.

מושגים ונוסחאות עיקריים.

שבירת האור - תופעת שינוי הכיוון של התפשטות האור במעבר מחומר שקוף אחד לחומר שקוף אחר.

מקדם השבירה של חומר - היחס בין מהירות האור בריק למהירות האור בחומר.

c - מהירות האור בריק

$$n = \frac{c}{v} \qquad (1)$$

v - מהירות האור בחומר

מקדם השבירה היחסי של החומר האחד ביחס לחומר אחר - היחס בין המהירויות בחומרים.

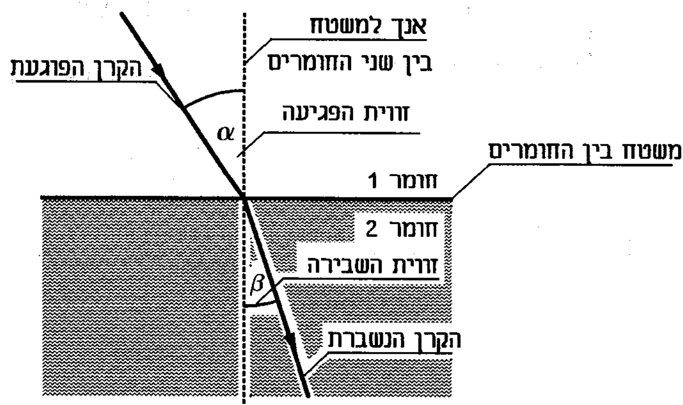
v_1 - מהירות האור בחומר הראשון

v_2 - מהירות האור בחומר השני

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (2)$$

n_1 - מקדם השבירה של החומר הראשון

n_2 - מקדם השבירה של החומר השני



חוקי שבירת האור:

א) הקרן הפוגעת, הקרן הנשברת והאנך למשטח בין שני החומרים בנקודת הפגיעה נמצאים במישור אחד.

ב) חוק סנל [Snell] - היחס בין הסינוס של זווית הפגיעה לסינוס של זווית השבירה הוא ערך קבוע לשני החומרים הנתונים, ושווה למקדם השבירה היחסי של החומרים.

α - זווית הפגיעה

β - זווית השבירה

n_1 - מקדם השבירה של החומר הראשון

n_2 - מקדם השבירה של החומר השני

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \qquad (3)$$

החזרה גמורה - תופעה, בה קרן הפוגעת במשטח בין שני חומרים שקופים אינה עוברת לחומר השני, אלא מוחזרת לחומר הראשון. התופעה אפשרית רק כאשר הקרן מתפשטת בחומר עם מקדם שבירה גדול יותר ממקדם השבירה של החומר השני.

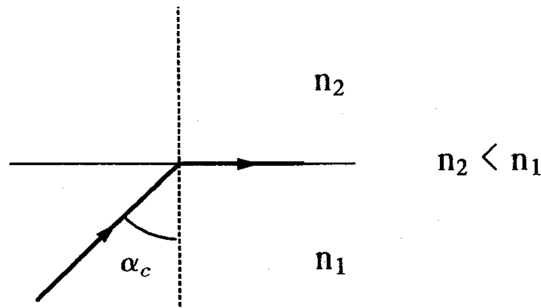
זווית קריטית - זווית מינימלית עבורה מתרחשת החזרה גמורה.

α_c - זווית קריטית

n_1 - מקדם השבירה של החומר הראשון

n_2 - מקדם השבירה של החומר השני

$$\sin\alpha_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (4)$$



בעיה קרן אור מתפשטת באוויר ופוגעת בדופן של לוחית עשוייה זכוכית ($n=1.5$) (ראה איור 1). חלק מהאור מוחזר מהדופן העליונה של הלוחית, וחלק נכנס לזכוכית ויוצא בצד השני של הלוחית.

שאלות

1. שרטט את מהלך הקרניים בחדירת האור לזכוכית.
2. חשב את זווית השבירה של הקרן בזכוכית.
3. חשב את הזוות בין הקרן הנשברת לבין הקרן המוחזרת מהדופן העליונה של הלוחית. מהי זווית הפגיעה, אם הקרן הנשברת מאונכת לקרן המוחזרת?
4. חשב את הזווית, בה הקרן יוצאת מהזכוכית לאוויר.
5. חשב את הסטייה בין הקרן הפוגעת בלוחית לבין הקרן היוצאת ממנה.

---

6. על הלוחית הנתונה שמים לוחית אחרת, אשר עשוייה מחומר עבורו מקדם השבירה הוא n_2. (ראה איור 2)

א) שרטט את מהלך הקרניים בשתי הלוחיות.

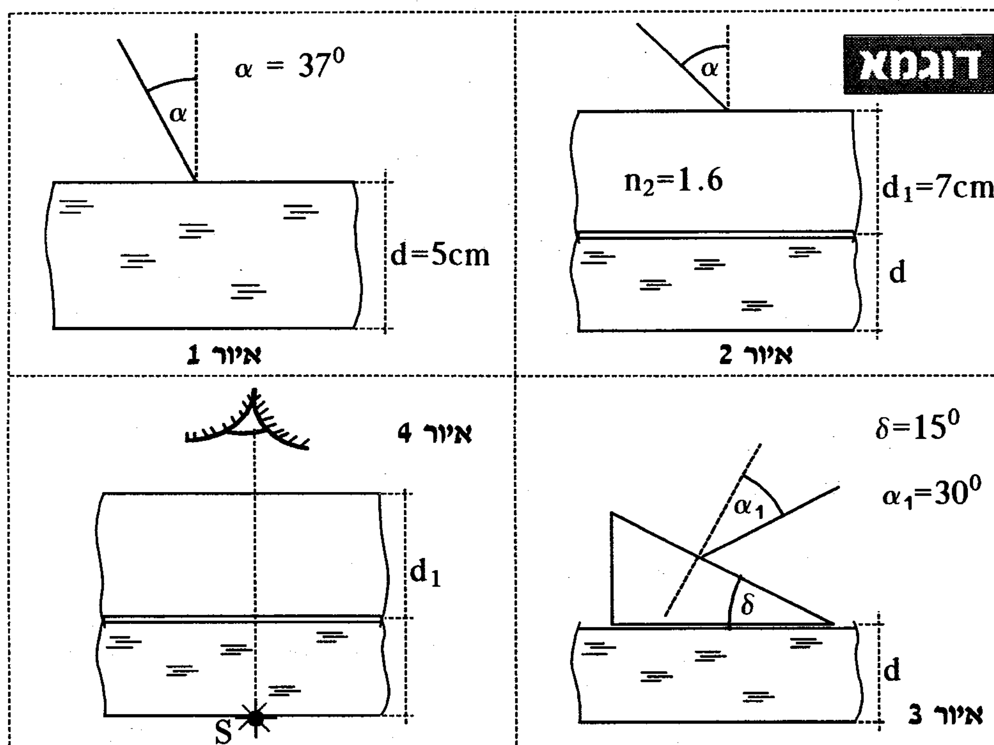
ב) חשב את הזווית בה יוצאת הקרן מהלוחית השנייה לאוויר.

7 . ממקמים מתחת ללוחיות מקור אור נקודתי (ראה איור 3).

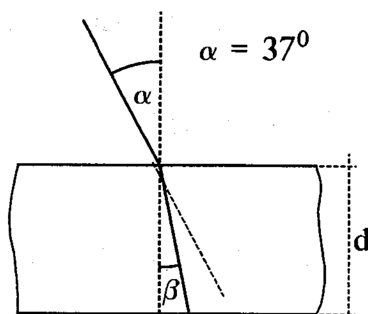
חשב את השטח של כתם האור על פני הדופן של הלוחית העליונה.

8 . באיזה מרחק מהדופן העליונה רואה הצופה את מקור האור, אם כיוון הראיה מאונך ללוחית (ראה איור 3) ?

9 . על הלוחית שמים טריז עשוי חומר בעל מקדם שבירה $n_3= 2.4$ (ראה איור 4). שרטט את מהלך הקרניים במערכת.



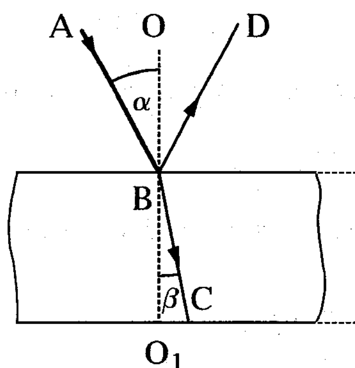
פתרון



1. קרן אור עוברת מחומר בעל מקדם השבירה קטן יותר (אוויר) לחומר בעל מקדם השבירה גדול יותר (זכוכית). משום כך זווית השבירה תהיה קטנה יותר מזווית הפגיעה, והקרן הנשברת תהיה יותר קרובה לאנך מאשר הקרן הפוגעת (ראה איור משמאל).

2. בהתאם לחוק סנל: $\frac{n_{\text{זכוכית}}}{n_{\text{אוויר}}} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$, מכאן: $\sin\beta = \frac{n_{\text{אוויר}} \bullet \sin\alpha}{n_{\text{זכוכית}}}$.

הצבת נתוני הבעיה גוררת: $\beta = \arcsin(\frac{1 \bullet \sin37^0}{1.5}) = 23.65^0$



3. חלק מהאור, הפוגע בדופן העליונה של הלוחית, מוחזר, וחלק חודר לתוך הזכוכית. לפי חוק החזרת האור (נוסחה 1, עמוד 1): $\angle ABO = \angle OBD = 37^0$.

נתבונן בזווית OBO_1, שגודלה 180^0:

$\angle OBO_1 = \angle O_1BC + \angle CBD + \angle OBD$.

מכאן:

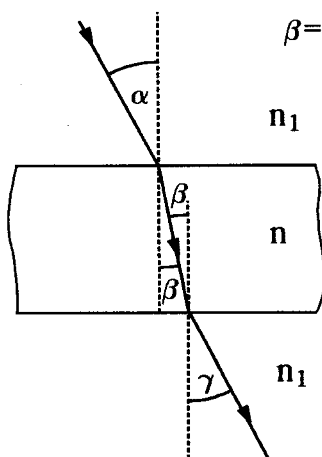
$$\angle CBD = 180^0 - \angle OBD - \angle O_1BC = 180^0 - 37^0 - 23.65^0 = 119.35^0$$

לחישוב זווית הפגיעה α_1 של קרן האור, כאשר $\angle CBD = 90^0$, נרשום:

$\angle CBD = 180^0 - \alpha_1 - \beta_1$ או: $\beta_1 = 90^0 - \alpha_1$.

על פי חוק סנל: $\sin\beta_1=\frac{n_1\sin\alpha_1}{n}$ (כאן n_1 -מקדם השבירה של אוויר). מהביטויים עבור $\sin\beta_1$ ו-β_1 מקבלים:

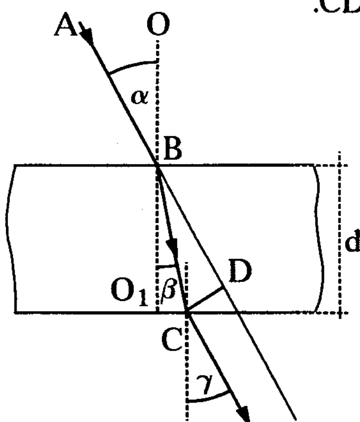
$$\alpha_1 = \arctan\frac{n}{n_1} = \arctan 1.5 = 56.31^0$$



4. במעבר מהלוחית לאוויר תשמש זווית השבירה $\beta=23.65^0$ (שאלה 1) בתור זווית הפגיעה. אם נסמן ב-γ את זווית השבירה (מלוחית לאוויר), אז חוק סנל גורר:

$$\frac{\sin\beta}{\sin\gamma} = \frac{n_1}{n} \Longrightarrow \gamma = \arcsin(\frac{n\bullet\sin\beta}{n_1}) = 37^0$$

<u>מסקנה:</u> אם מעל ומתחת ללוחית נמצא אותו חומר, אז הקרן הפוגעת בלוחית מקבילה לקרן היוצאת ממנה.



5. את סטיית הקרן $|CD|$ נמצא ממשולש ישר זווית CDB:

$$|CD| = |CB|\bullet\sin(\alpha-\beta).$$

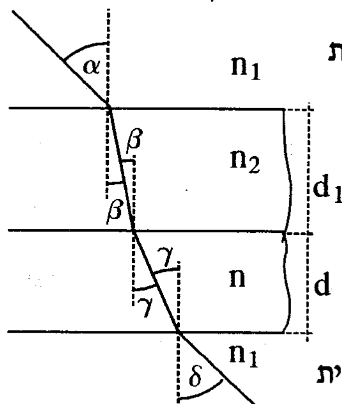
אורך הקטע CB מחושב מהמשולש CO_1B:

$$|CB| = \frac{|O_1B|}{\cos\beta} = \frac{d}{\cos\beta}.$$

הצבת הביטוי שנתקבל בביטוי עבור סטיית הקרן והצבת הנתונים המספריים מביאות לתוצאה:

$$|CD| = \frac{d\sin(\alpha-\beta)}{\cos\beta} = 1.26\text{cm}.$$

6. א) לבניית מהלך הקרניים, נעזר בעובדה, שבמעבר מחומר בעל מקדם השבירה קטן יותר לחומר בעל מקדם השבירה גדול יותר, זווית השבירה קטנה מזווית הפגיעה, ולהפך. ראה את מהלך הקרניים בשתי הלוחיות באיור.



ב) לחישוב זווית היציאה של הקרן מהלוחית השנייה, נשתמש בחוק סנל שלוש פעמים: למעבר מהאוויר ללוחית הראשונה, מהלוחית הראשונה ללוחית השנייה ומהלוחית השנייה לאוויר.

למעבר הראשון: $\beta = \arcsin(\frac{n_1 \bullet \sin\alpha}{n_2}) = \arcsin(\frac{1 \bullet \sin 37^0}{1.6}) = 22.09^0$

למעבר השני: $\gamma = \arcsin(\frac{n_2 \bullet \sin\beta}{n}) = \arcsin(\frac{1.6 \bullet \sin 22.09^0}{1.5}) = 23.65^0$

למעבר השלישי: $\delta = \arcsin(\frac{n \bullet \sin\gamma}{n_1}) = \arcsin(\frac{1.5 \bullet \sin 23.65^0}{1}) = 37^0$

לתוצאה, שנתקבלה משמעות דומה לתוצאה של שאלה 4, כלומר, אם לפני ואחרי מערכת הלוחיות נמצא אותו חומר, אז זווית הפגיעה והזווית בה הקרן יוצאת מהמערכת שוות. על מנת לוודא, שתוצאה זו אינה מקרית, נבצע את תהליך חישוב זווית היציאה באופן כללי:

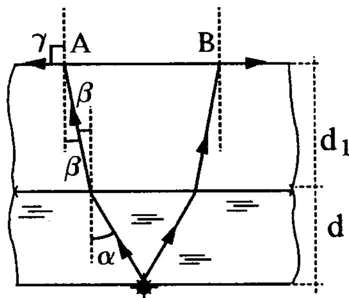
למעבר הראשון: $\sin\beta = (\frac{n_1 \bullet \sin\alpha}{n_2})$

למעבר השני: $\sin\gamma = \frac{n_2 \bullet \sin\beta}{n} = \frac{n_2 \bullet \frac{n_1 \bullet \sin\alpha}{n_2}}{n} = \frac{n_1 \bullet \sin\alpha}{n}$

למעבר השלישי: $\delta = \arcsin(\frac{n \bullet \sin\gamma}{n_1}) = \arcsin(\frac{n \bullet \frac{n_1 \bullet \sin\alpha}{n}}{n_1}) = \alpha$

כפי שנטען.

7. הדופן העליונה נראת לצופה מוארת רק במקומות, מהם יוצאות קרני האור. משמאל לנקודה A ומימין לנקודה B הקרניים אינן יוצאות לאוויר, עקב התרחשות של תופעת החזרה הגמורה. כלומר, הזווית β היא זווית קריטית במקרה של מעבר הקרן מחומר בעל מקדם השבירה n_2 לאוויר. נחשב את הזווית β לפי הנוסחה (4):



$$.\beta = \arcsin(\frac{n_1}{n_2}) = 38.68^0$$

בהתאם לחוק סנל (נוסחה 3), נקבוע את הזווית α המתאימה לזווית β:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n} \Longrightarrow \alpha = \arcsin(\frac{n_2 \bullet \sin\beta}{n}) = \arcsin(\frac{1.6 \bullet 0.625}{1.5}) = 41.81^0$$

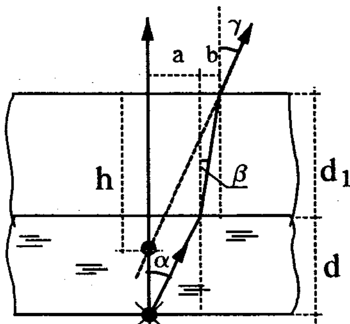
מהשרטוט רואים כי:

$$.|AB| = 2(d \bullet \tan\alpha + d_1 \bullet \tan\beta) = 20.15\text{cm}$$

היות ו- S הוא מקור אור נקודתי, ומקרין אור בכל הכיוונים, צורת הכתם של האור תהיה עיגול, שקוטרו $a = |AB|$, ואז שטח הכתם הוא: $.\frac{\pi a^2}{4} = 319\text{cm}^2$



8. נעביר שתי קרניים ממקור האור S: אחת במאונך לדפנות הלוחיות (קרן זו אינה נשברת), וקרן שנייה בזווית קטנה α. שתי הקרניים נכנסות לעין, והעומק המדומה h המבוקש מתבטא על ידי: $. h = \frac{a+b}{\tan\gamma}$



מהמשולשים ΔSAB ו-ΔBCD מקבלים: $a = d\tan\alpha$,

$b=d_1\tan\beta$. נציב את הביטויים שנתקבלו בביטוי עבור h:

$$h=\frac{d\tan\alpha+d_1\tan\beta}{\tan\gamma}=\frac{d\tan\alpha}{\tan\gamma}+\frac{d_1\tan\beta}{\tan\gamma}$$

מאחר והזוויות α,β,γ הן קטנות, ניתן לרשום את הביטוי האחרון בקירוב כך:

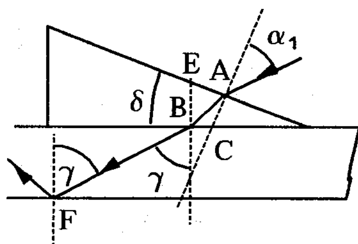
$$h=\frac{d\sin\alpha}{\sin\gamma}+\frac{d_1\sin\beta}{\sin\gamma}$$

על פי הנוסחה (3) $\frac{\sin\beta}{\sin\gamma}=\frac{n_1}{n_2}$, $\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=\frac{n_1}{n}$, ואז $h=\frac{d\bullet n_1}{n}+\frac{d_1\bullet n_1}{n_2}=7.7cm$.

9. נבדוק אם זווית הפגיעה של הקרן במעבר מהטריז

ללוחית היא קטנה או גדולה יותר מהזווית הקריטית לשני

חומרים. בהתאם לנוסחה (4):



$$\alpha_c=\arcsin(\frac{1.5}{2.4})=38.68^0$$

בעזרת חוק סנל נחשב את זווית השבירה:

$$\angle CAB=\arcsin(\frac{1\bullet\sin30^0}{2.4})=12^0$$

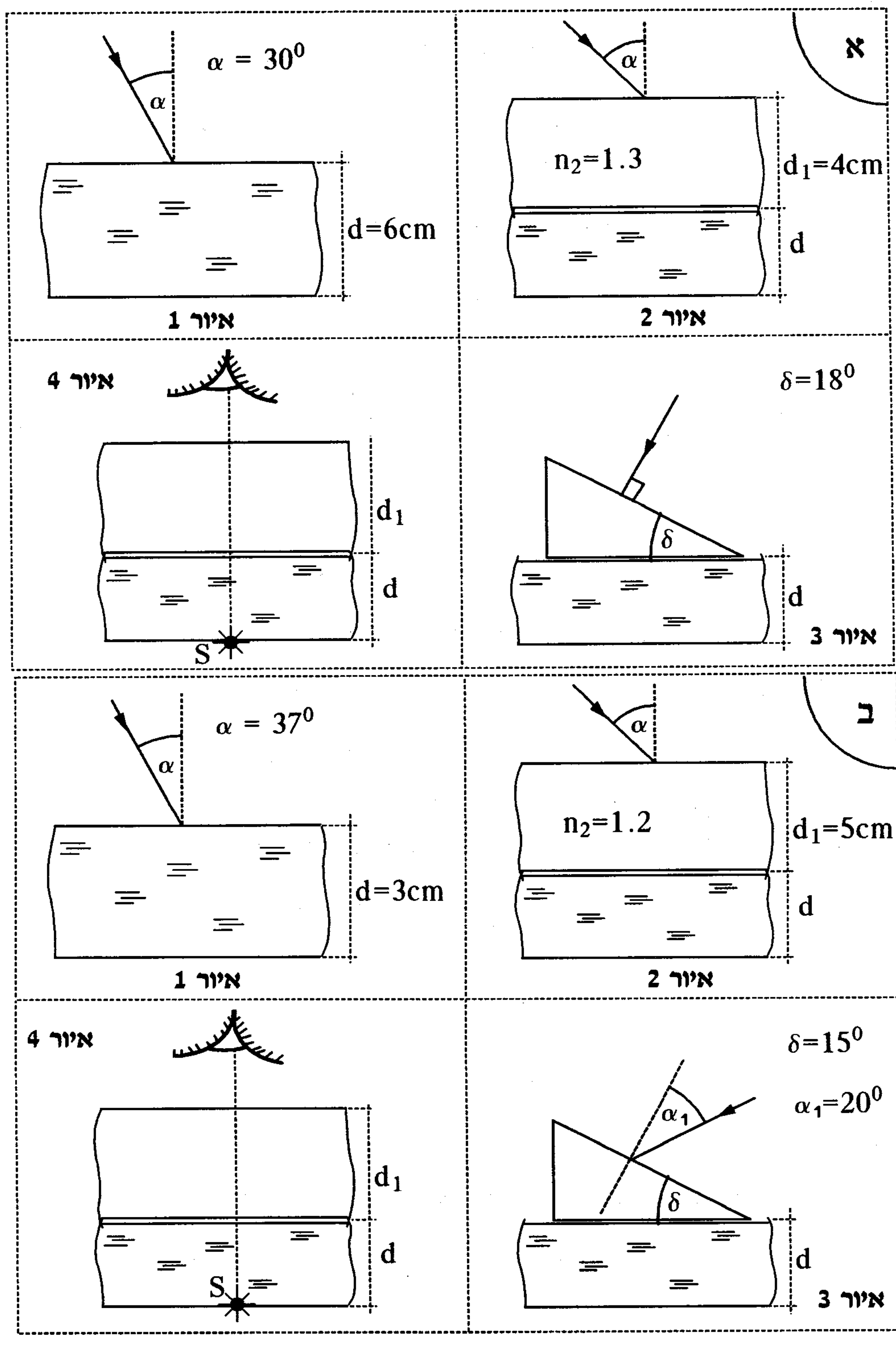
השרטוט מראה, שזווית הפגיעה במעבר מהטריז ללוחית היא:

$$\angle EBA=\delta+\angle CBA=27^0$$

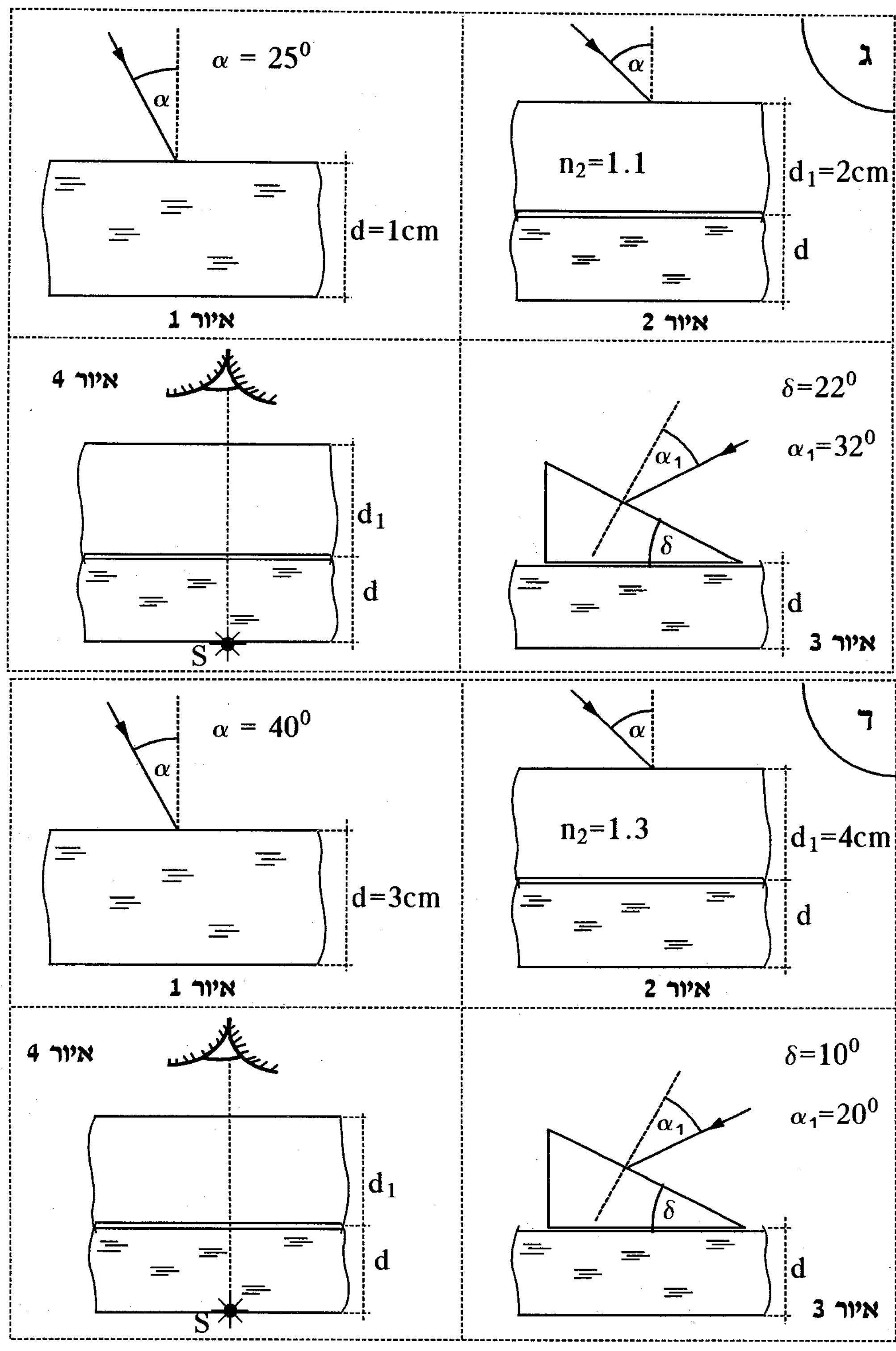
זווית זו קטנה מ-α_c, (כלומר, הקרן עוברת מהטריז ללוחית). על פי חוק סנל:

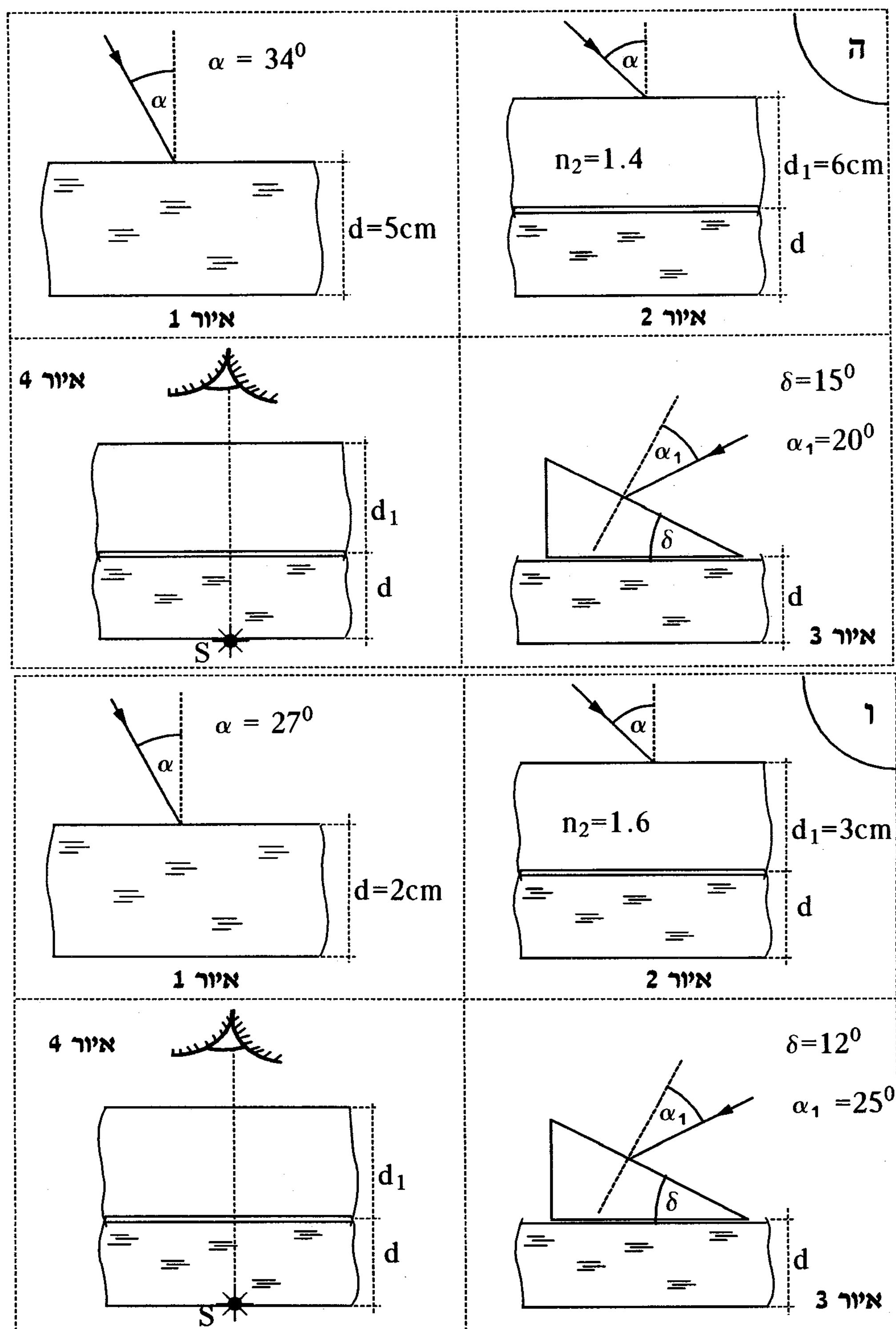
$\gamma=46.58^0$. זווית זו גדולה יותר מהזווית הקריטית למעבר "זכוכית-אוויר",

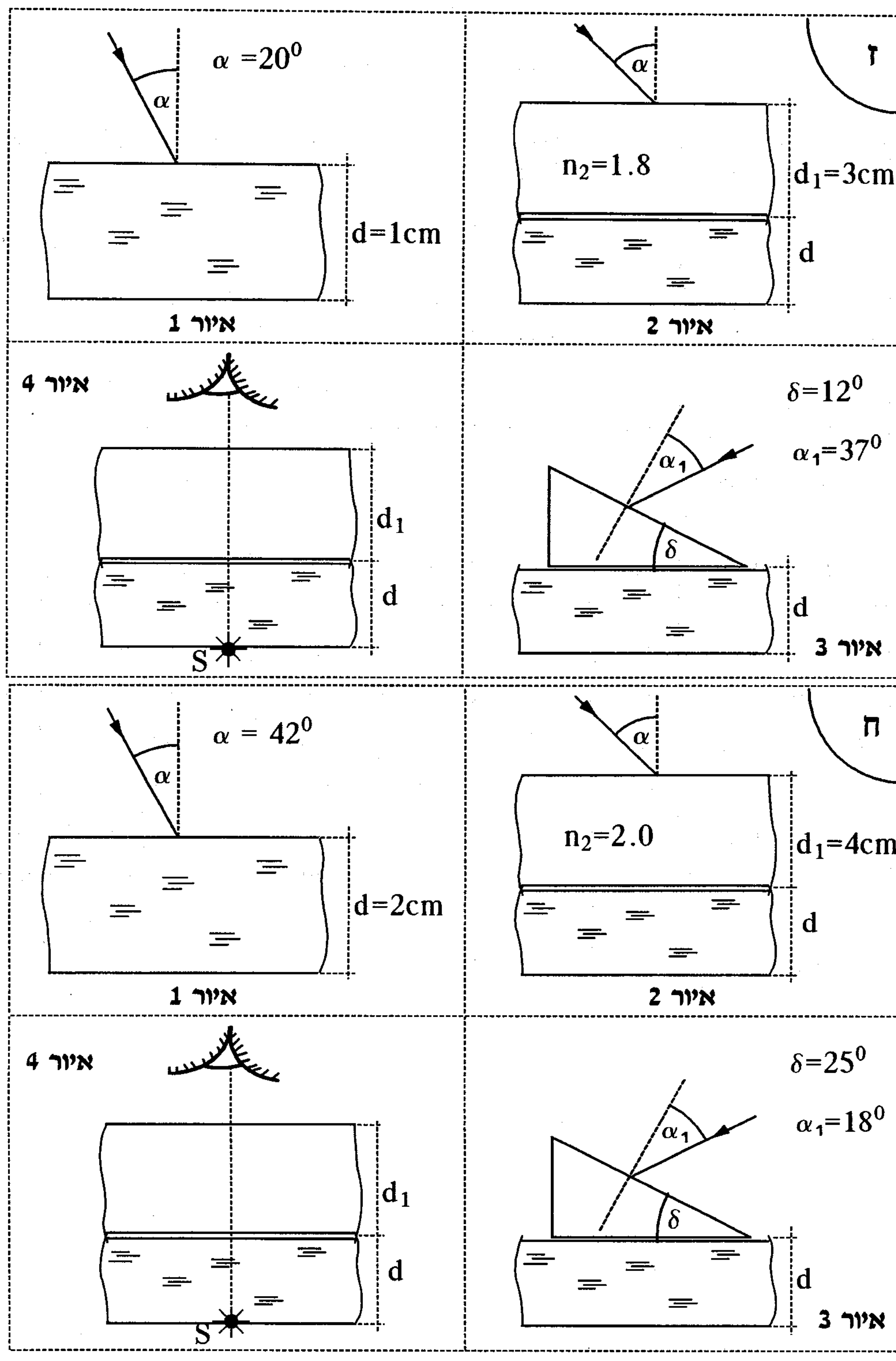
(שהיא 41.8^0), ולכן בנקודה F מתרחשת החזרה גמורה.



א
$\alpha = 30^0$
α
d=6cm
איור 1
α
$n_2=1.3$
$d_1=4cm$
d
איור 2
איור 4
d_1
d
S
$\delta=18^0$
δ
d
איור 3
ב
$\alpha = 37^0$
α
d=3cm
איור 1
α
$n_2=1.2$
$d_1=5cm$
d
איור 2
איור 4
d_1
d
S
$\delta=15^0$
$\alpha_1=20^0$
α_1
δ
d
איור 3


ג
α = 25⁰
α
d=1cm
איור 1
α
n₂=1.1
d₁=2cm
d
איור 2
איור 4
d₁
d
S
δ=22⁰
α₁=32⁰
α₁
δ
d
איור 3
ד
α = 40⁰
α
d=3cm
איור 1
α
n₂=1.3
d₁=4cm
d
איור 2
איור 4
d₁
d
S
δ=10⁰
α₁=20⁰
α₁
δ
d
איור 3


ה
α = 34⁰
α
d=5cm
איור 1
α
n₂=1.4
d₁=6cm
d
איור 2
איור 4
d₁
d
S
δ=15⁰
α₁=20⁰
α₁
δ
d
איור 3
ו
α = 27⁰
α
d=2cm
איור 1
α
n₂=1.6
d₁=3cm
d
איור 2
איור 4
d₁
d
S
δ=12⁰
α₁ =25⁰
α₁
δ
d
איור 3



ז
$\alpha = 20^0$
α
d=1cm
איור 1
α
n_2=1.8
d_1=3cm
d
איור 2
איור 4
d_1
d
S
$\delta=12^0$
$\alpha_1=37^0$
α_1
δ
d
איור 3
ח
$\alpha = 42^0$
α
d=2cm
איור 1
α
n_2=2.0
d_1=4cm
d
איור 2
איור 4
d_1
d
S
$\delta=25^0$
$\alpha_1=18^0$
α_1
δ
d
איור 3

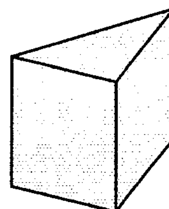
דף תשובות לסדרה " שבירת האור".

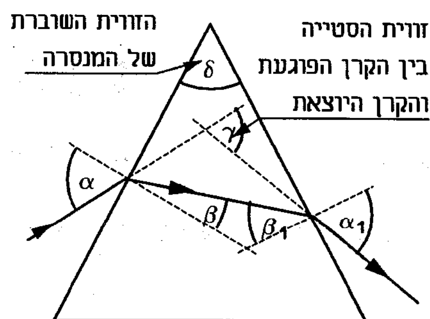
h cm	S cm^2	δ	|CD| cm	γ	α_1	$\angle CBD$	β	
7.08	325.6	30^0	1.16	30^0	56.31^0	130.52^0	19.47^0	א
6.17	328.2	37^0	0.76	37^0	56.31^0	119.35^0	23.65^0	ב
2.48	86.88	25^0	0.16	25^0	56.31^0	138.64^0	16.36^0	ג
5.08	176.6	40^0	0.84	40^0	56.31^0	114.63^0	25.37^0	ד
7.62	352.6	34^0	1.13	34^0	56.31^0	124.11^0	21.89^0	ה
3.21	55.17	27^0	0.34	27^0	56.31^0	135.38^0	17.62^0	ו
2.33	26.39	20^0	0.12	20^0	56.31^0	146.82^0	13.18^0	ז
3.33	52.76	42^0	0.60	42^0	56.31^0	111.51^0	26.49^0	ח

4. שבירת האור. מנסרות.

מושגים ונוסחאות עיקריים.

מנסרה -גוף שקוף, המוגבל על ידי מישורים מהם לפחות שניים מקבילים.





זווית הסטייה:

α - זווית הפגיעה

α_1 - זווית היציאה

δ - הזווית השוברת של המנסרה

$$\gamma = \alpha+\alpha_1-\delta \qquad (1)$$

זווית הסטייה המינימלית:

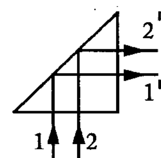
n - מקדם השבירה של החומר,

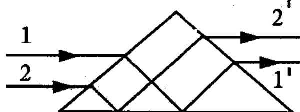
ממנו עשוייה מנסרה

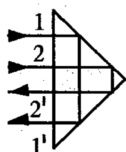
δ - הזווית השוברת של המנסרה

$$\gamma_{min} = 2\arcsin(n\sin\frac{\delta}{2})-\delta \qquad (2)$$

מהלך הקרניים במנסרות מיוחדות:







בעיה

מנסרה משולשת ישרה, שבסיסה הוא משולש, המובא באיור 1, עשויה מחומר עבורו מקדם השבירה הוא n. קרן אור המתפשטת באוויר פוגעת בפאה הצדדית של המנסרה.

שאלות

1. **שרטט את מהלך הקרן במנסרה.**
2. **חשב את זווית הסטייה בין הקרן הפוגעת ובין הקרן היוצאת.**

---

3. **מכניסים את המנסרה לתוך חומר שקוף עבורו מקדם השבירה הוא n_1.**

   א) שרטט את מהלך הקרן במנסרה.

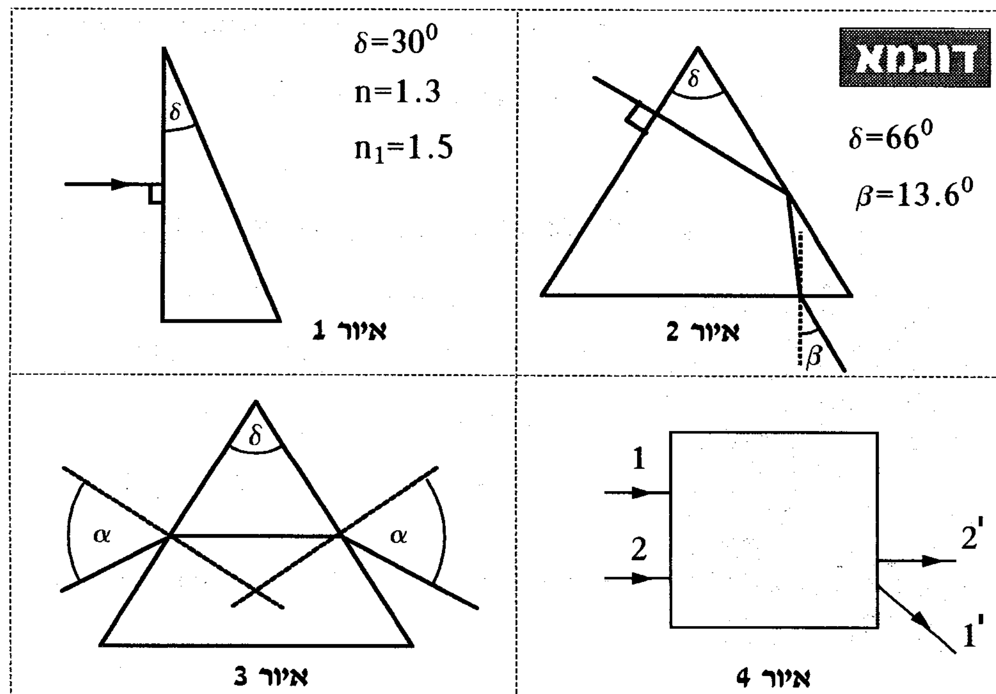
   ב) חשב את זווית הסטייה.

4. **מחליפים את המנסרה במנסרה משולשת אחרת, שבסיסה הוא משולש שווה שוקיים. קרן אור הפוגעת במאונך בפאה הצדדית, מוחזרת החזרה גמורה מהפאה השניה, ויוצאת דרך הפאה השלישית בזווית β (ראה איור 2). חשב את מקדם השבירה n_2 של החומר ממנו עשוייה המנסרה.**

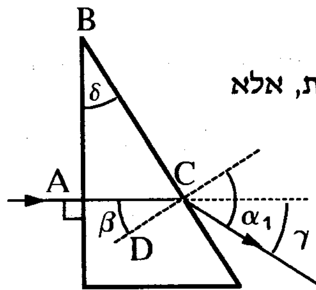
5. משנים את זווית הפגיעה עד אשר מגיעים למצב בו זווית הפגיעה שווה לזווית יציאת הקרן מהמנסרה (איור 3). חשב את זווית הפגיעה.

6. קרן אור פוגעת בזווית במנסרה שעשוייה מחומר בעל מקדם השבירה n_2. הזווית השוברת של המנסרה קטנה פי 10 מהזווית δ שבשאלה 4. חשב את זווית הסטייה בין הקרן הפוגעת ובין הקרן היוצאת.

7. ב"קופסה שחורה" נמצאת מנסרה. באיור 4 נתון מהלך שתי קרניים לפני הפגיעה במנסרה, שבתוך הקופסה, ומאחוריה. קבע, איזה מנסרה נמצאת בתוך ה"קופסה השחורה".



פתרון



1. קרן אור הפוגעת במאונך בפאת המנסרה אינה נשברת, אלא עוברת דרך המנסרה ופוגעת בפאה השנייה של המנסרה בזווית β. במעבר הזה הקרן נשברת כלפי מטה, משום שהיא עוברת מחומר בעל מקדם השבירה גדול יותר לחומר בעל מקדם השבירה קטן יותר. את מהלך הקרן במנסרה ניתן לראות באיור.

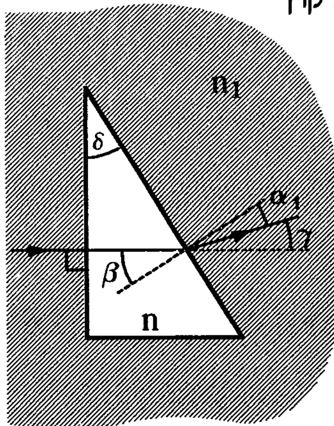
2. זווית הסטייה בין הקרן הפוגעת לבין הקרן היוצאת מהמנסרה היא: $\gamma=\alpha_1-\beta$.

נעיין בשתי זוויות שוות: CBA ו-DCA ($\beta=\delta=30^0$). לפי חוק סנל, הזווית α_1 היא:

$$\alpha_1 = \arcsin(\frac{n \bullet \sin\beta}{n_{\text{אוויר}}}) = 40.54^0$$

נציב את גודלי הזוויות שנתקבלו בביטוי עבור γ ונקבל:

$\gamma = 40.54^0 - 30^0 = 10.54^0$.



3. **א)** השינוי המתרחש במהלך הקרן מתבטא בכך, שכעת קרן האור עוברת ביציאתה מהמנסרה מחומר עבורו מקדם השבירה קטן יותר, לחומר עבורו מקדם השבירה גדול יותר. לכן זווית השבירה α_1 תהיה קטנה מהזווית הפגיעה β (ראה איור).

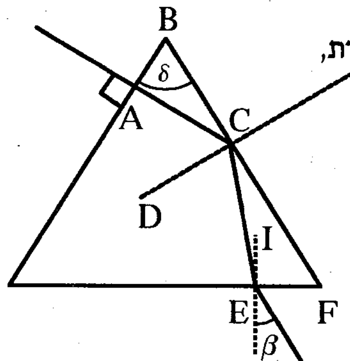
ב) במקרה הנדון זווית הסטייה היא: $\gamma = \beta - \alpha_1$.

על פי חוק סנל, זווית α_1 היא:

$$.\alpha_1 = \arcsin(\frac{n\bullet\sin\beta}{n_1}) = \arcsin(\frac{1.3\bullet\sin30^0}{1.5}) = 25.68^0$$

(גודל הזווית β נקבע בפתרון לשאלה 2). מהביטוי עבור זווית הסטייה γ ומחישוב

האחרון מקבלים: $.\gamma = 30^0-25.68^0 = 4.32^0$



4. קרן אור הפוגעת במאונך בפאת המנסרה אינה נשברת, אלא עוברת דרך המנסרה ופוגעת בפאה השנייה של המנסרה בזווית DCA. לקביעת זווית זו, נתבונן בשתי זוויות שוות CBA ו-DCA (זווית הפגיעה $\angle DCA=66^0$). לפי תנאיי הבעיה, בנקודה C מתרחשת החזרה גמורה, ועל פי הנוסחה 1 (עמוד 1), זווית הפגיעה DCA שווה לזווית ההחזרה ECD. הזווית FCE היא הזווית המשלימה את הזווית ECD ל-90^0,

ולכן $.\angle FCE=90^0-66^0=24^0$

מאחר ובסיס המנסרה הוא משולש שווה שוקיים, זווית הבסיס היא:

$$.\angle EFC = 90^0-\frac{\delta}{2} = 57^0$$

מהמשולש EFC נקבע את הזווית FEC : $.\angle FEC = 180^0-24^0-57^0 = 99^0$

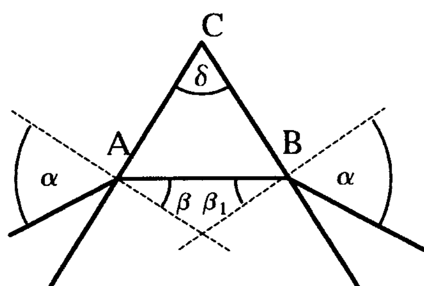
מכאן זווית הפגיעה IEC היא:

$$.\angle IEC = 99^0-90^0=9^0$$

על פי חוק סנל, מקדם השבירה n_2 הוא:

$$\frac{\sin(\angle IEC)}{\sin\beta} = \frac{n_{\text{אוויר}}}{n_2} \Longrightarrow n_2 = \frac{n_{\text{אוויר}}\bullet\sin\beta}{\sin(\angle IEC)} = \frac{1\bullet\sin13.6^0}{\sin9^0} = 1.5$$

5. מאחר וזווית הפגיעה של קרן האור שווה לזווית



יציאתה מהמנסרה, הזוויות β ו-β_1 שוות.

הזוויות $\angle BAC$ ו-$\angle ABC$ משלימות את הזוויות β

ו-β_1 ל-90^0, כלומר, $\angle ABC=\angle BAC=90^0-\beta$.

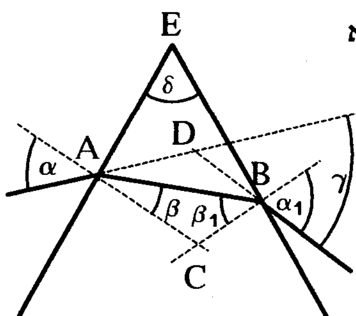
מאידך, מהמשולש ΔABC מקבלים:

$$\angle BAC=\angle ABC=90^0-\frac{\delta}{2}$$

שני השיוויונות האחרונים גוררים: $\beta=\frac{\delta}{2}$. חוק סנל במקרה זה יירשם כך:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\frac{\delta}{2}}=\frac{n_2}{n_{\text{אוויר}}}$$

מכאן: $$\alpha=\arcsin(n_2\bullet\sin\frac{\delta}{2})=54.78^0$$



6. זווית הסטייה γ בין הקרן הפוגעת והקרן היוצאת היא

הזווית החיצונית של המשולש ABD:

$$\gamma=\angle DAB+\angle DBA$$

נסמן ב -α, β, β_1 ו-α_1 את זוויות הפגיעה והשבירה

בפאה הראשונה ובפאה השנייה של המנסרה בהתאמה.

קיים: $\gamma=\alpha-\beta+\alpha_1-\beta_1$.

מאחר והזוויות קטנות, ניתן להניח ש: $\sin\beta\approx\beta$, $\sin\alpha\approx\alpha$ וכו׳, ולכן לפי חוק סנל:

$\frac{\alpha}{\beta}=\frac{n_2}{n_{\text{אוויר}}}$, $\frac{\beta_1}{\alpha_1}=\frac{n_{\text{אוויר}}}{n_2}$; מכאן: $\alpha=n_2\bullet\beta,\ \alpha_1=n_2\bullet\beta_1$.

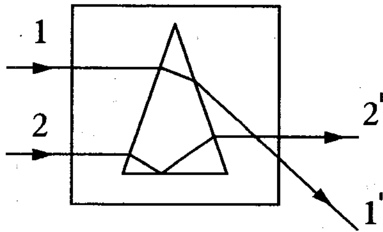
מהמרובע ACBE: $\angle ACB=180^0-\delta$. מהמשולש ACB: $\angle ACB=180^0-\beta-\beta_1$.

השוואת הביטויים עבור $\angle ACB$ גוררת:

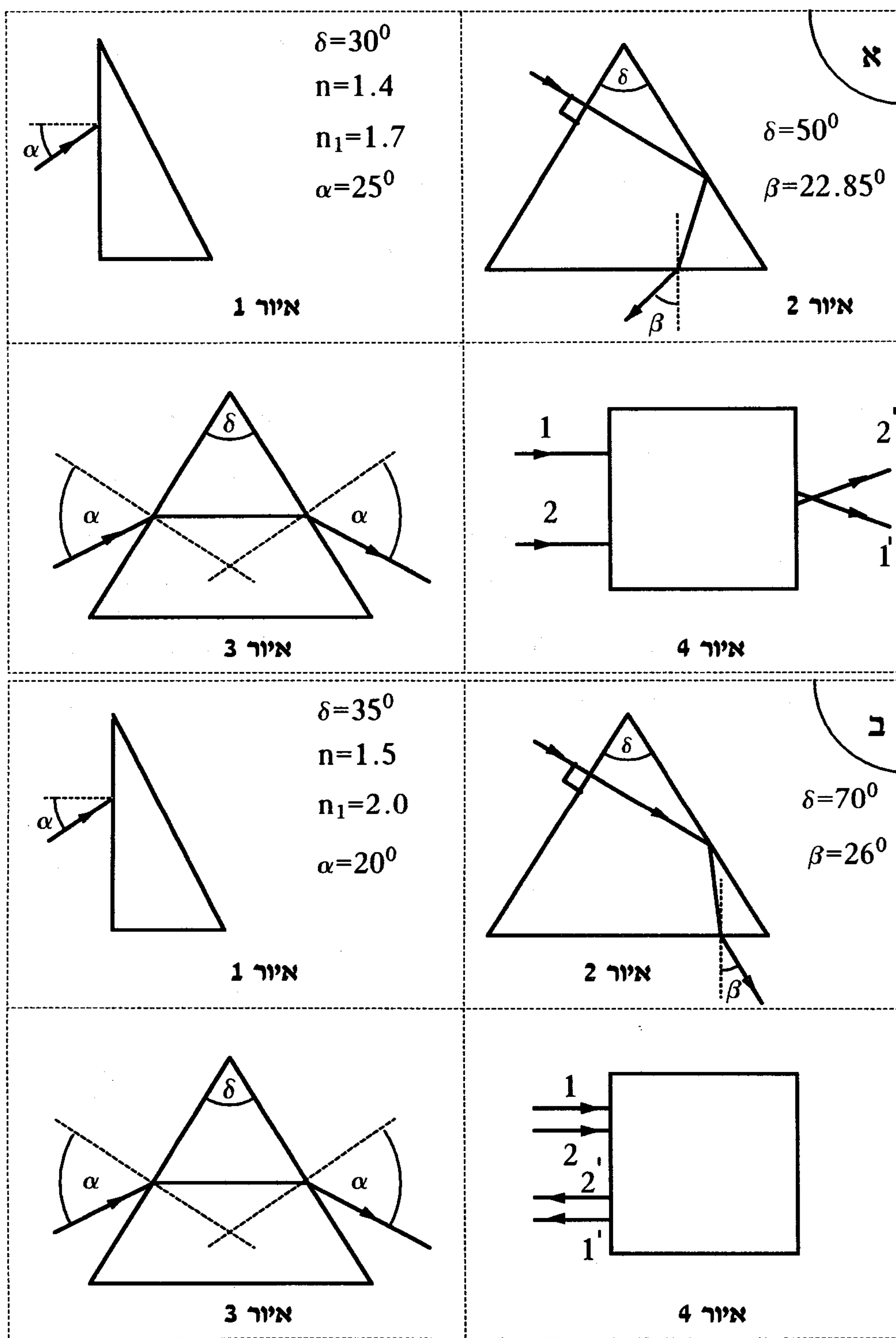
$$\beta_1 = \delta - \beta$$

נציב את הביטויים עבור α_1, α ו-β_1 בביטוי עבור זווית הסטייה ונקבל:

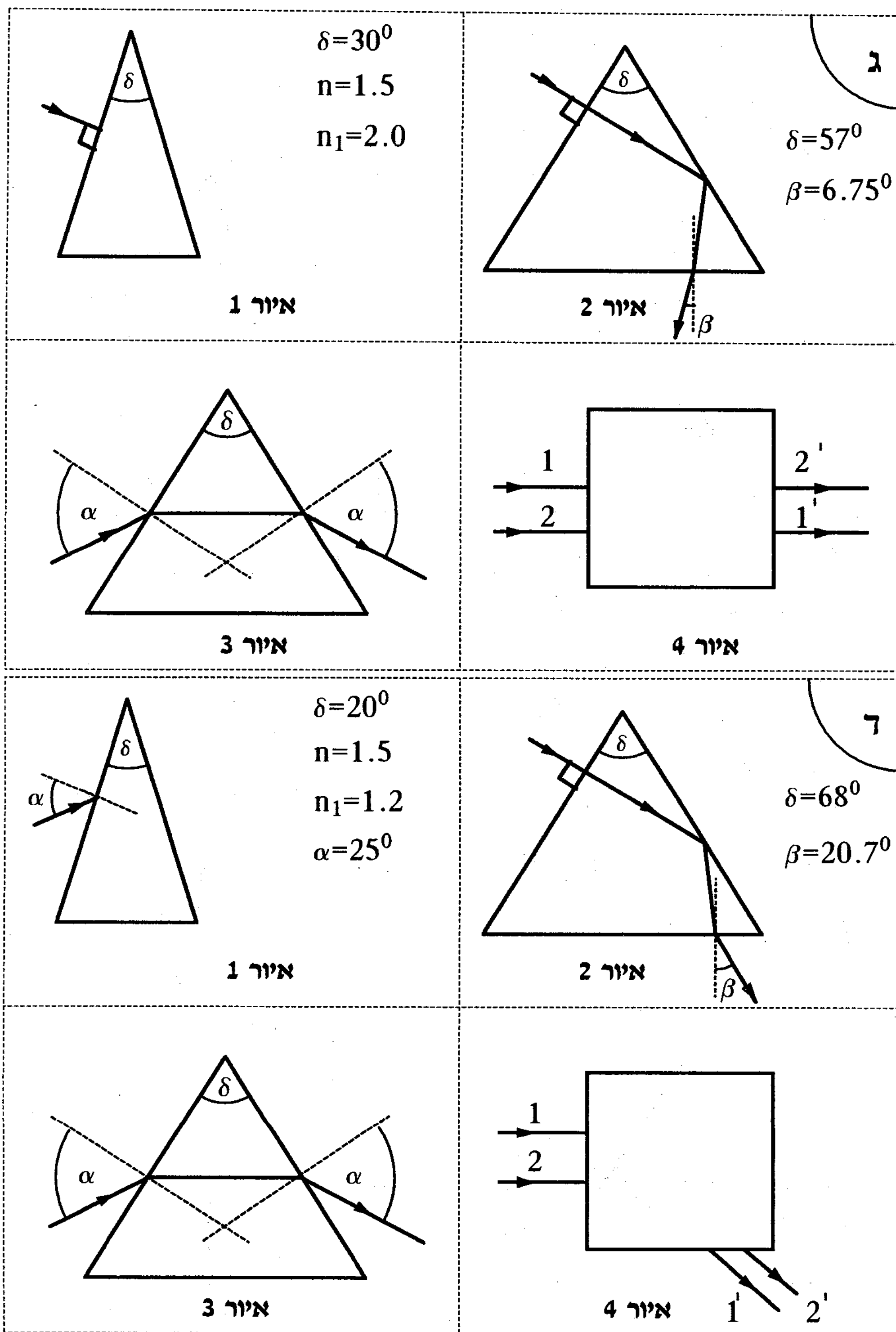
$$\gamma = n_2 \bullet \beta - \beta + n_2 \bullet (\delta - \beta) - (\delta - \beta) = \delta(n_2 - 1) = 3.3^0$$



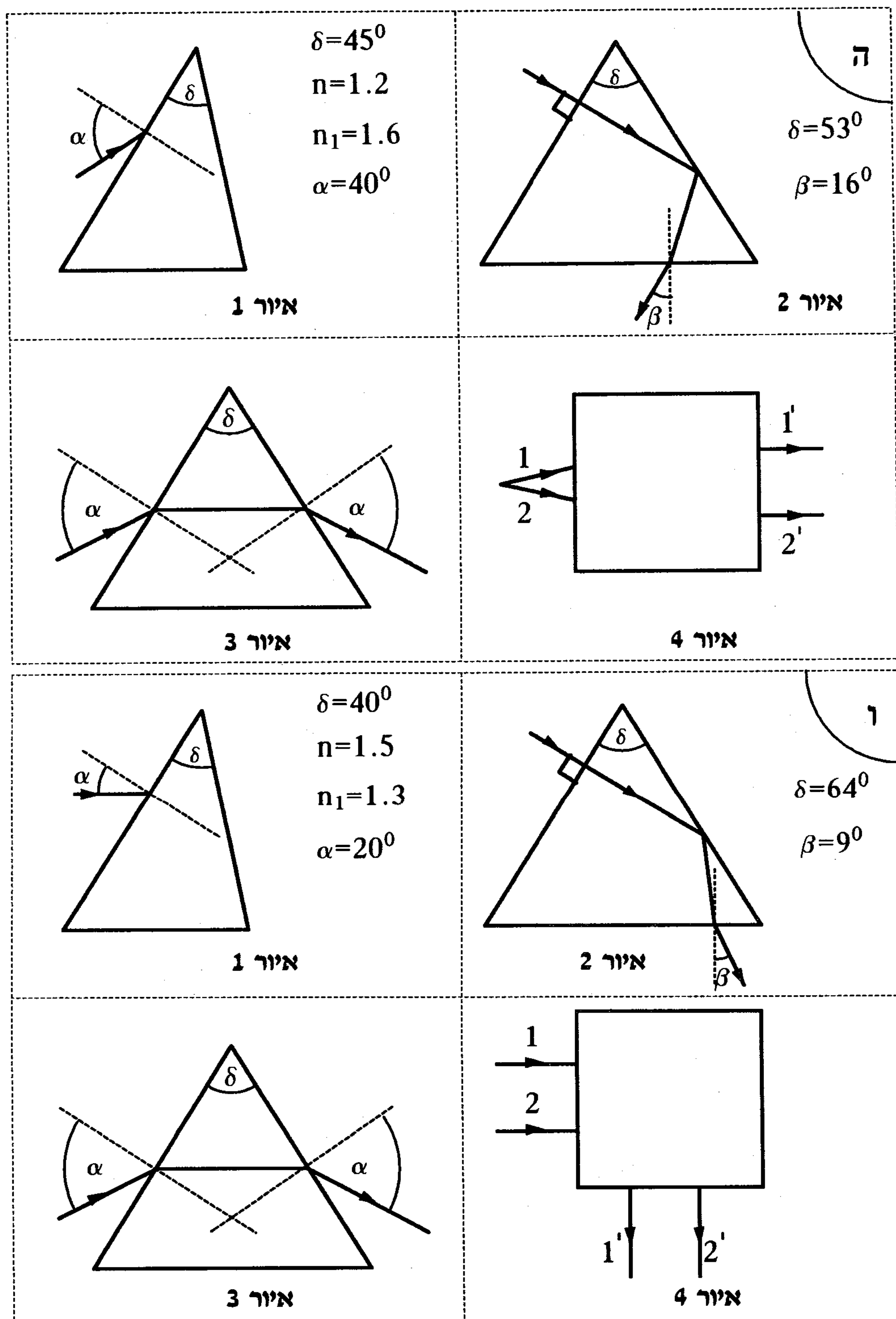
7. ידוע שקרן אור הפוגעת במנסרה נשברת כלפי בסיסה. איור 4 מראה, שקרן 1 נשברת כלפי מטה, ואז ניתן להניח, שבסיס המנסרה הוא למטה. מהלך הקרן השנייה מראה, שהיא יוצאת במקביל לקרן הנכנסת. הדבר אפשרי, רק אם, לאחר השבירה, הקרן אינה מגיעה לפאה הצדדית, אלא מגיעה לבסיס, מוחזרת ממנו החזרה גמורה, ורק לאחר מכן יוצאת מהמנסרה.



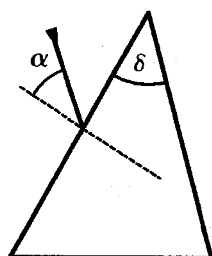
א
δ=30⁰
n=1.4
n₁=1.7
α=25⁰
α
איור 1
δ
δ=50⁰
β=22.85⁰
β
איור 2
δ
α
α
איור 3
1
2
2'
1'
איור 4
ב
δ=35⁰
n=1.5
n₁=2.0
α=20⁰
α
איור 1
δ
δ=70⁰
β=26⁰
β
איור 2
δ
α
α
איור 3
1
2
2'
1'
איור 4



ג
$\delta=30^0$
$n=1.5$
$n_1=2.0$
איור 1
$\delta=57^0$
$\beta=6.75^0$
איור 2
α
α
איור 3
1
2
2'
1'
איור 4
ד
$\delta=20^0$
$n=1.5$
$n_1=1.2$
$\alpha=25^0$
איור 1
$\delta=68^0$
$\beta=20.7^0$
איור 2
α
α
איור 3
1
2
איור 4
1'
2'


ה
δ=45⁰
n=1.2
n1=1.6
α=40⁰
איור 1
δ=53⁰
β=16⁰
איור 2
איור 3
1
2
1'
2'
איור 4
ו
δ=40⁰
n=1.5
n1=1.3
α=20⁰
איור 1
δ=64⁰
β=9⁰
איור 2
איור 3
1
2
1'
2'
איור 4

ז



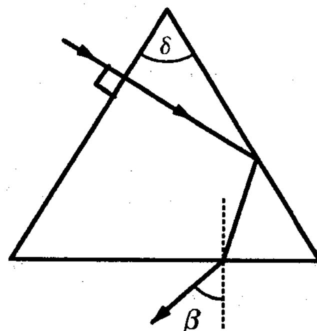
$\delta=35^0$

$n=1.3$

$n_1=1.6$

$\alpha=15^0$

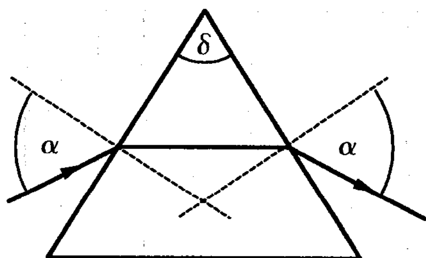
איור 1



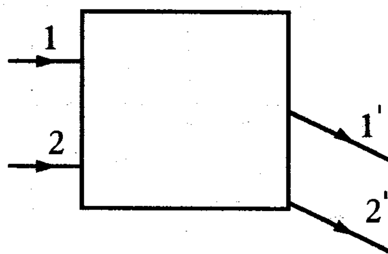
$\delta=45^0$

$\beta=35^0$

איור 2

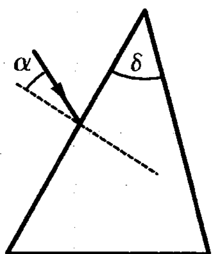


איור 3



איור 4

ח



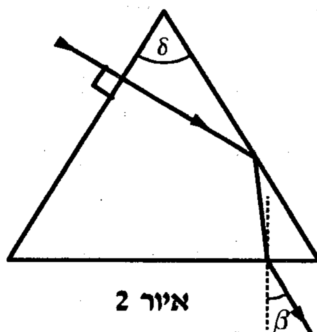
$\delta=30^0$

$n=1.6$

$n_1=1.6$

$\alpha=8^0$

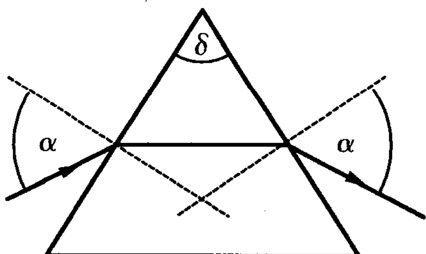
איור 1



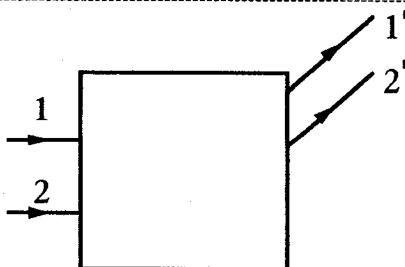
$\delta=74^0$

$\beta=27.8^0$

איור 2



איור 3

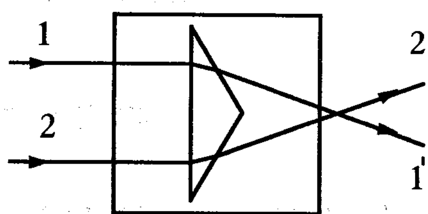


איור 4

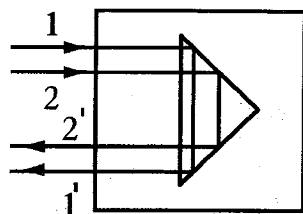
דף תשובות לסדרה " שבירת האור. מנסרות"

	שאלה 2	שאלה 3	שאלה 4	שאלה 5	שאלה 6
	γ	γ	n_2	α	γ
א	12.53^0	5.7^0	1.5	39.34^0	2.5^0
ב	18.9^0	9.1^0	1.7	77.18^0	4.9^0
ג	18.59^0	8.0^0	1.5	45.7^0	2.85^0
ד	10.45^0	5.3^0	1.7	71.9^0	4.76^0
ה	10.19^0	15.5^0	1.5	42.0^0	2.65^0
ו	22.59^0	6.5^0	1.5	52.64^0	3.2^0
ז	20.56^0	9.18^0	1.5	35.03^0	2.25^0
ח	28.60^0	0	1.3	51.48^0	2.22^0

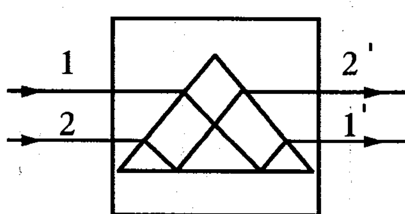
דוגמאות התשובות לשאלה מס' 7



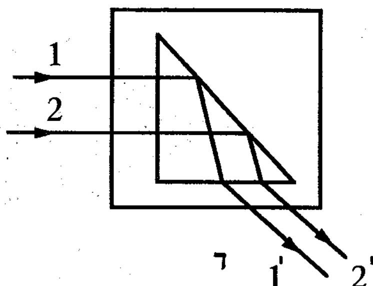
א



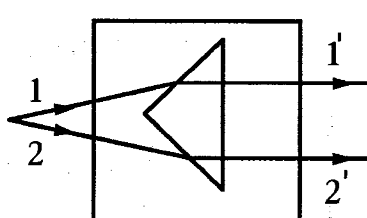
ב



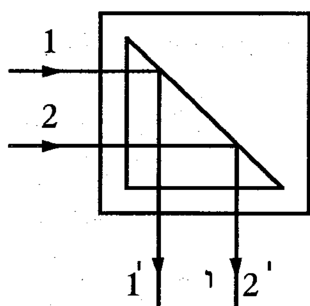
ג



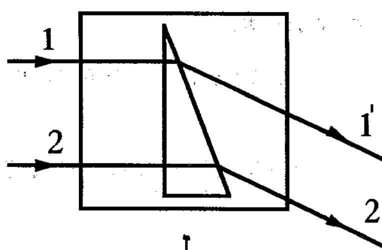
ד



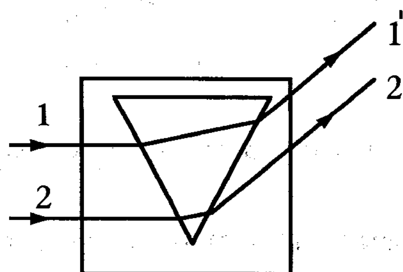
ה



ו



ז



ח

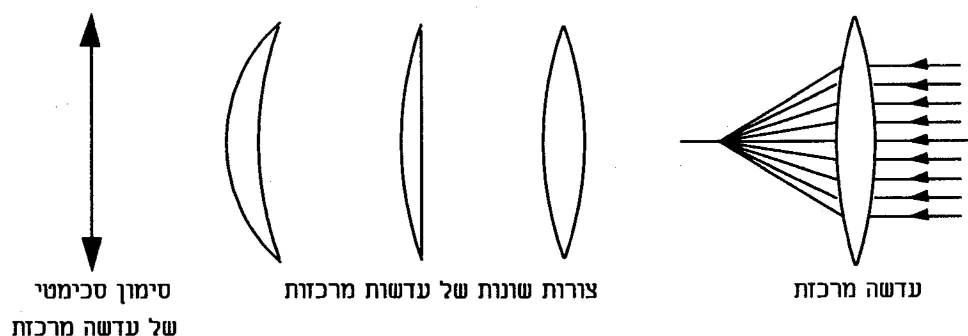
5.

עדשה.
בניית דמות בעדשה

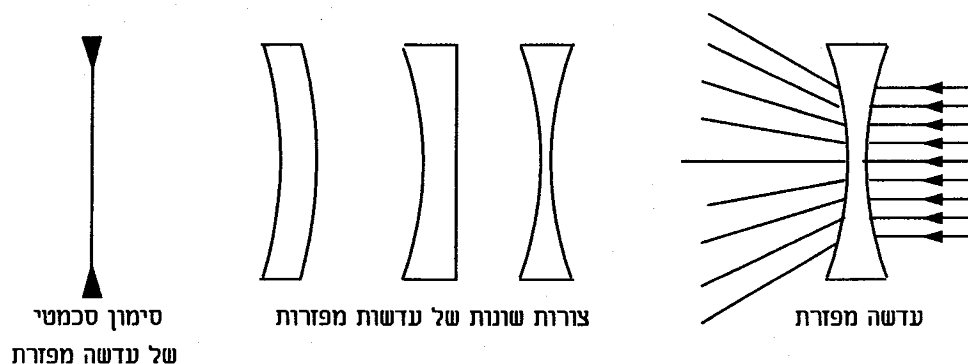
מושגים ונוסחאות עיקריים.

עדשה - גוף שקוף המוגבל על ידי שני משטחים עקומים (משטחים כדוריים, לרוב).

עדשה מרכזת - עדשה המרכזת את אלומת הקרניים המגיעה אליה..

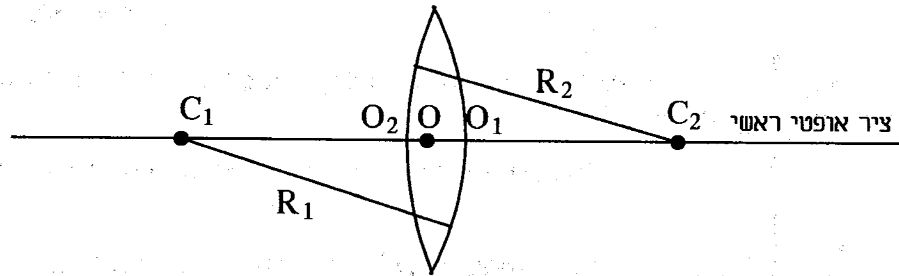


עדשה מפזרת - עדשה המפזרת את אלומת הקרניים המגיעה אליה.



ציר אופטי ראשי - ישר העובר דרך מרכזי המשטחים הכדוריים של העדשה.

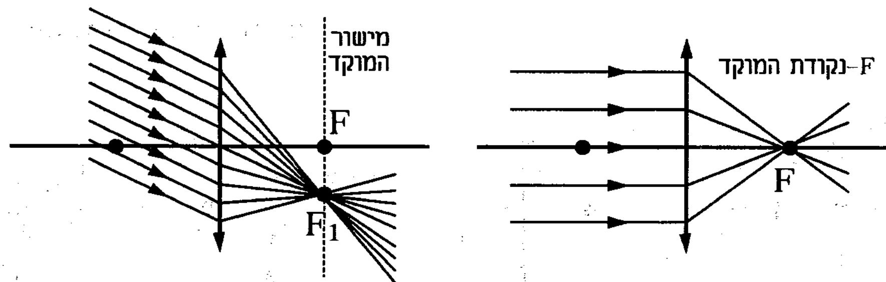
עדשה דקה - עדשה, שעוביה זניח בהשוואה לרדיוסים של המשטחים הכדוריים.



המרכז האופטי של העדשה - בעדשה דקה נקודות החיתוך O_1 ו-O_2 של הציר האופטי הראשי עם המשטחים הכדוריים מתלכדות בנקודה אחת O, הנקראת המרכז האופטי של העדשה.

ציר אופטי (משני) - ישר העובר דרך המרכז האופטי (אשר אינו מתלכד עם הציר האופטי הראשי).

מוקד העדשה - נקודת המפגש של קרניים, המתפשטות במקביל לציר אופטי ראשי, מאחרי העדשה.

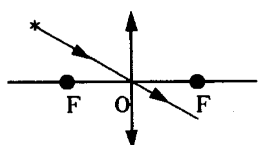


מישור המוקד - מישור העובר דרך נקודת המוקד והמאונך לציר אופטי ראשי.

קרניים, המקבילות לציר אופטי משני כלשהו, מאחורי העדשה נפגשות בנקודה השייכת למישור המוקד.

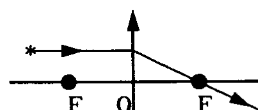
מוקד משני - נקודת החיתוך של מישור המוקד וציר אופטי משני (נקודה F_1 באיור למעלה משמאל).

בניית דמות בעדשה:

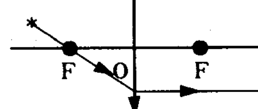


לבניית הדמות בעדשה משמשות קרניים, שמהלכן ידוע מראש:

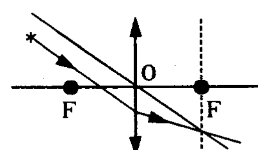
1. קרן המתפשטת לאורך ציר אופטי כלשהו (אין שבירה).



2. קרן המתפשטת לאורך ישר המקביל לציר אופטי ראשי עוברת דרך המוקד, שמאחורי העדשה.

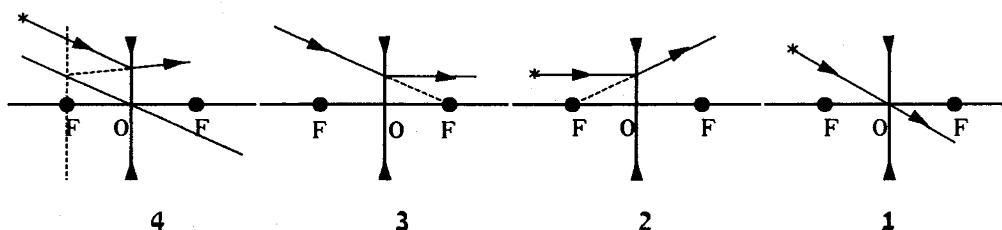


3. קרן לאורך ישר, העובר דרך המוקד מתפשטת מאחרי העדשה לאורך ישר המקביל לציר אופטי ראשי.



4. קרן המתפשטת לאורך ישר המקביל לציר אופטי משני עוברת מאחרי העדשה דרך מוקד משני.

לבניית הדמות בעדשה מפזרת משמשות אותן קרניים תוך התחשבות בעובדה, שמוקדי העדשה המפזרת הם מוקדים מדומים, כלומר אין קרן עצמה עוברת דרך מוקד מדומה, אלא המשכיה (ראה איורים למטה).

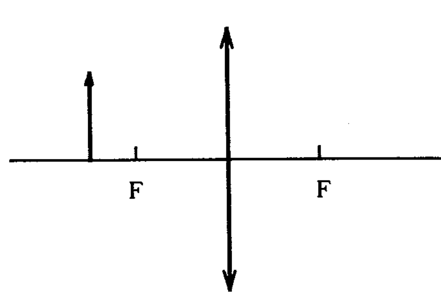


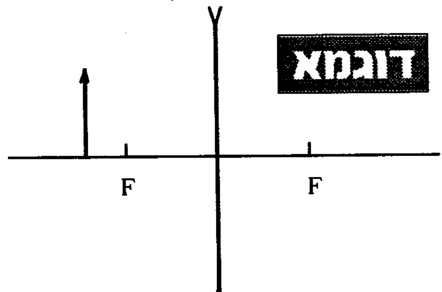
בעיה באיורים, המובאים למטה, מתוארים עדשות שונות, גופים או מקורות אור ומהלכי קרניים בעדשות. בכל איור חסר אלמנט כלשהו (דמות, מרכז אופטי, מוקד, מהלך הקרן וכו').

שאלות

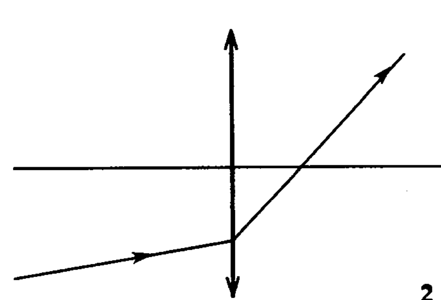
1. באיור 1 מוגדרים מיקומם של עדשות, מוקדים והגוף. בנה את דמות הגוף בעדשות הנתונות.
2. באיור 2 נתון מהלך הקרן בשתי עדשות: מרכזת ומפזרת. כמו כן, נתון המיקום של העדשות. קבע, בעזרת הבנייה, את מיקומם של מוקדי העדשות.
3. באיור 3 נתון מהלך הקרן בשתי עדשות: מרכזת ומפזרת. כמו כן, נתונים מיקום העדשות וקרן אחרת, הפוגעת בעדשה. המשך את מהלך הקרן בשתי העדשות הנתונות.
4. באיור 4 נתון מיקום הציר האופטי הראשי של שתי עדשות, מקור אור S ודמותו S_1. קבע את מיקומם של מרכז העדשה ומוקדיה, וגם את סוג העדשה בכל אחד מהמקרים.

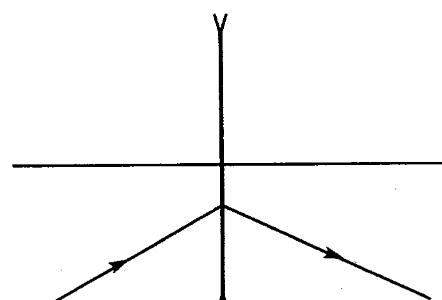
דוגמא



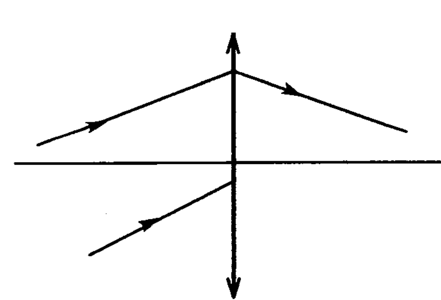


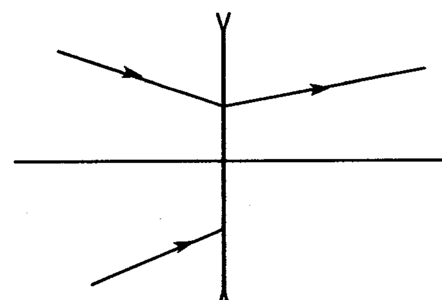
איור 1



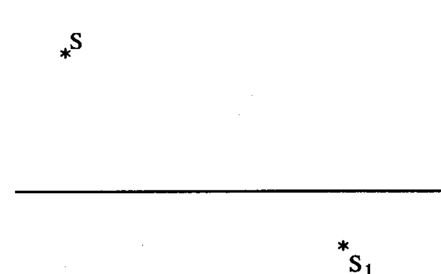


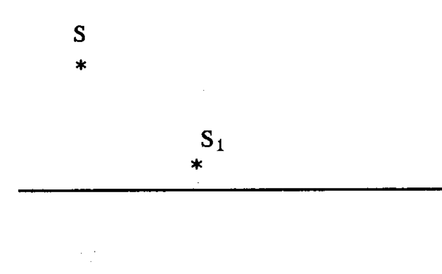
איור 2





איור 3

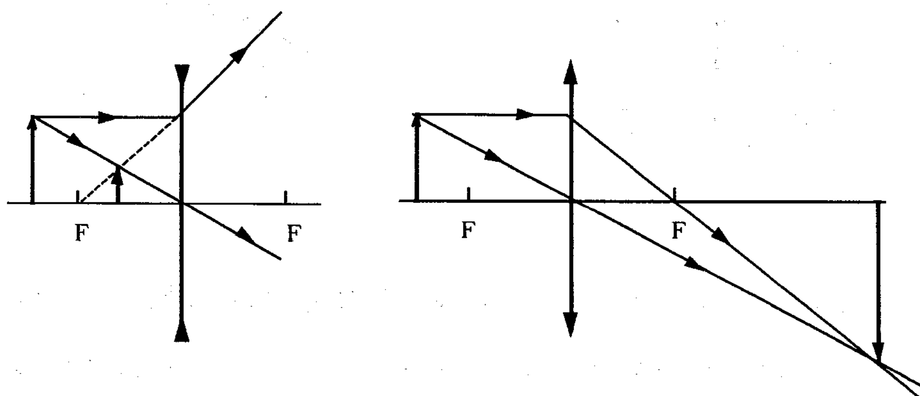




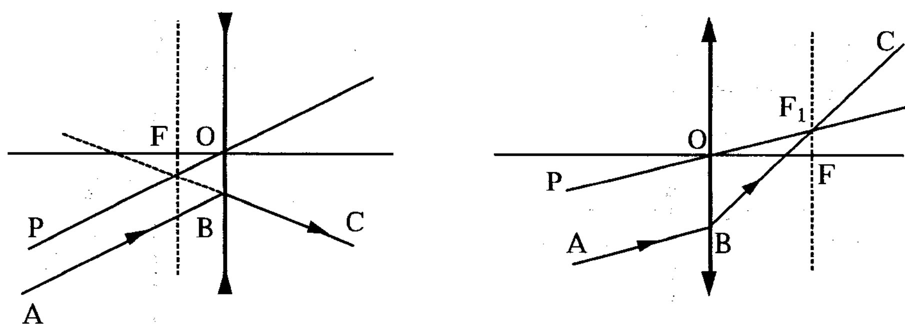
איור 4

פתרון

1. לקביעת מיקום הדמות של מקור אור מספיק לבנות מהלך של שתי קרניים - נקודת המפגש של הקרניים האלה מאחורי העדשה תיתן את הדמות של מקור האור (או נקודת המפגש של המשכי הקרניים - ואז הדמות היא דמות מדומה). לבניית דמויות הגופים שבאיור 1, נעזר בקרניים 1 ו-2:



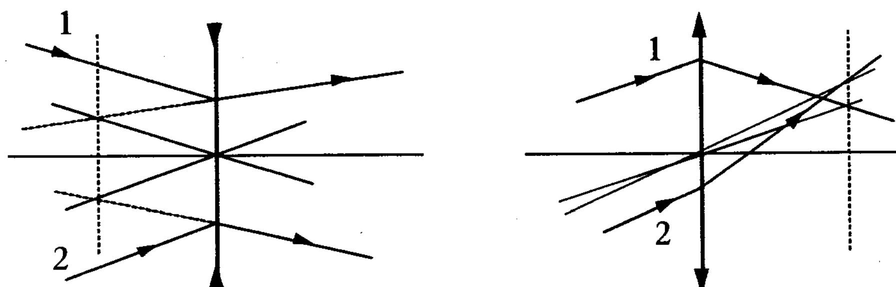
2. לקביעת מיקום המוקד, נעביר דרך המרכז האופטי O את הישר PO, המקביל לקרן AB. הישר הנ"ל נחתך עם הקרן BC בנקודה F_1, שהיא מוקד משני. נעביר אנך לציר אופטי ראשי דרך המוקד המשני, ונקבע את המוקד F של העדשה.



3. הבניה בתרגיל זה תיעשה בשני שלבים:

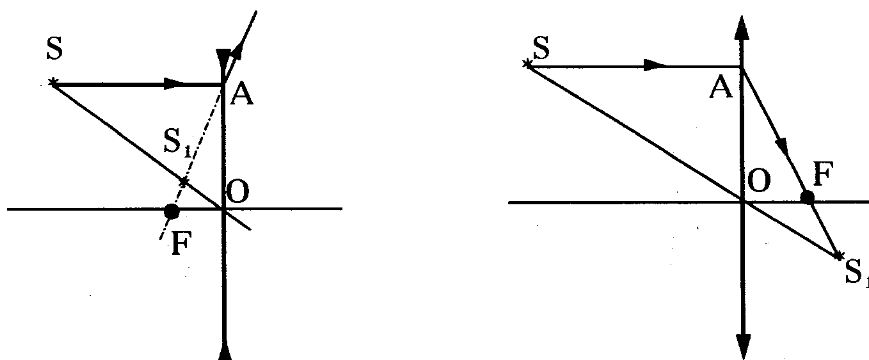
א) קביעת המיקום של מישור המוקד (ראה פיתרון לשאלה הקודמת).

ב) בניית מהלך הקרן 2 (קרן לאורך הישר המקביל לציר אופטי משני):

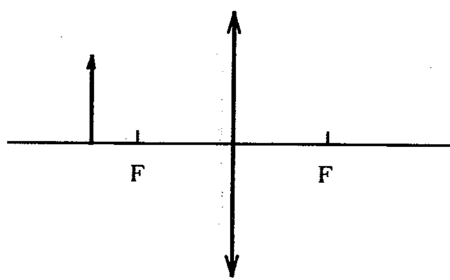


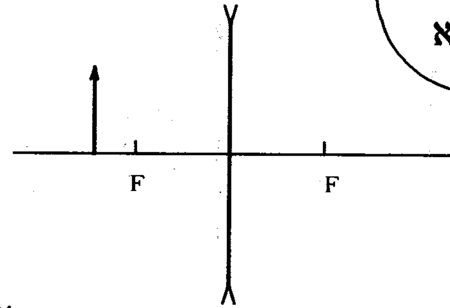
4. נעביר ישר SS_1. נקודת החיתוך O של הישר וציר אופטי ראשי היא המרכז האופטי של העדשה. אנך לציר אופטי ראשי מתלכד עם מיקומה של העדשה.

למציאת מוקד העדשה, נעזר בקרן 2: דרך נקודה S נעביר את הישר SA, המקביל לציר אופטי ראשי. את נקודת החיתוך A של הישר עם העדשה נחבר עם הנקודה S_1 . נקודת החיתוך של ישר AS_1 עם ציר אופטי ראשי היא מוקד העדשה.

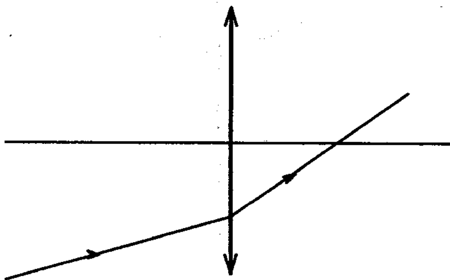


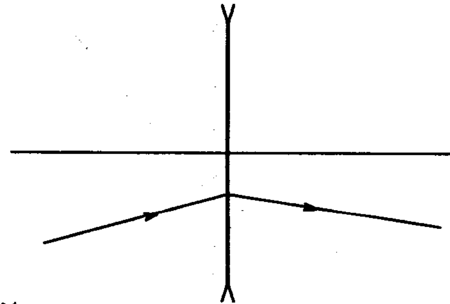
א



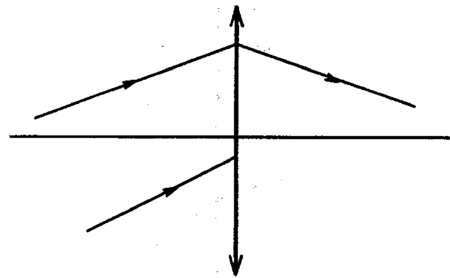


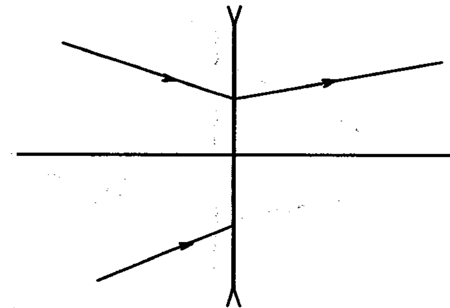
איור 1





איור 2





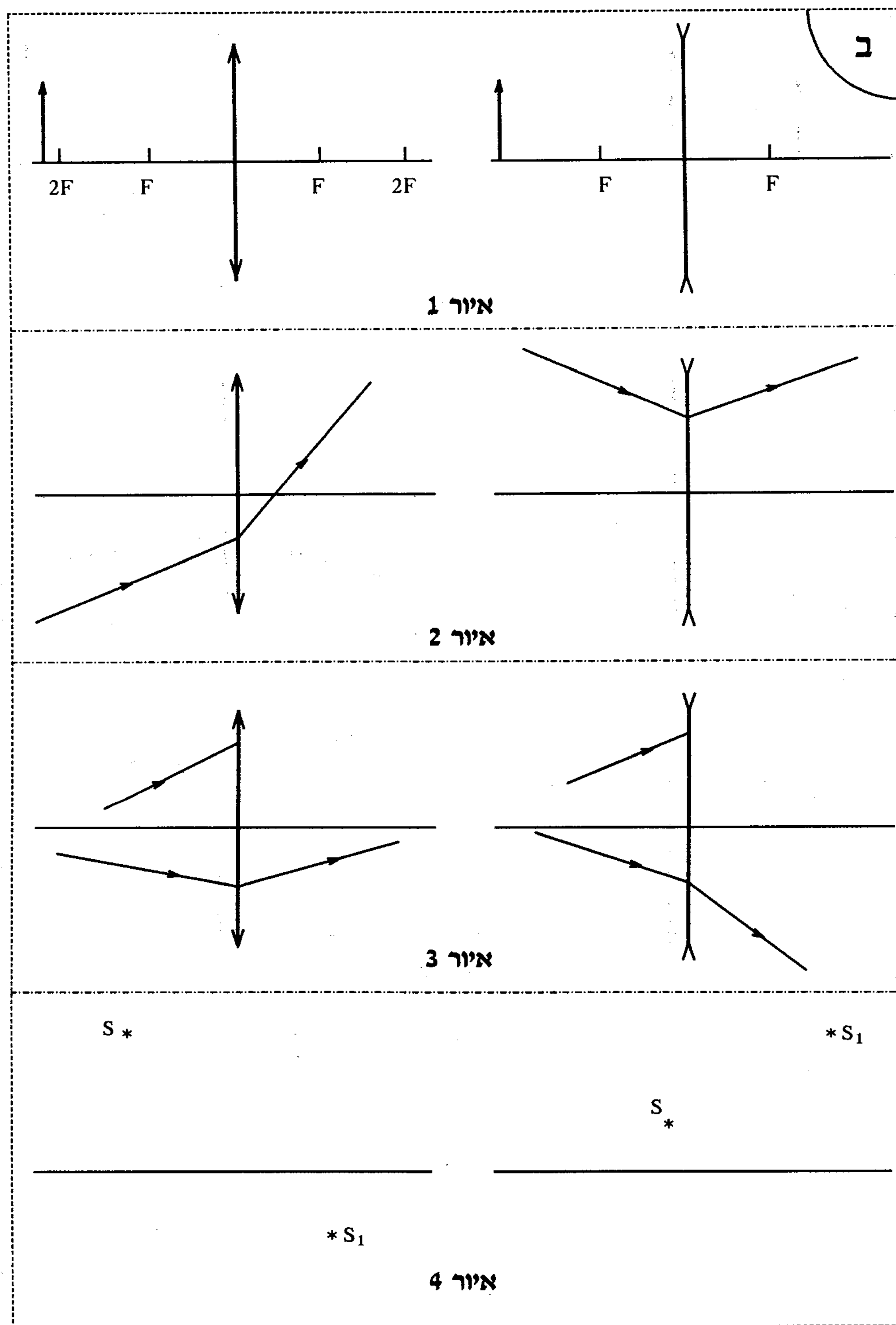
איור 3

S *

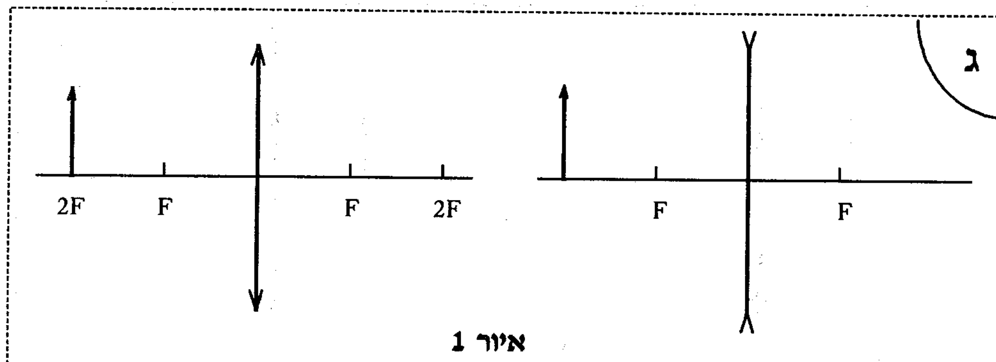
S *

S_1 *

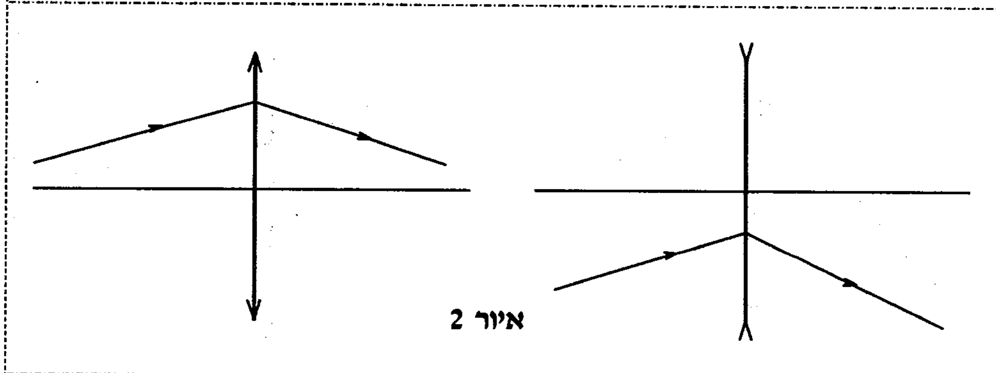
איור 4 * S_1

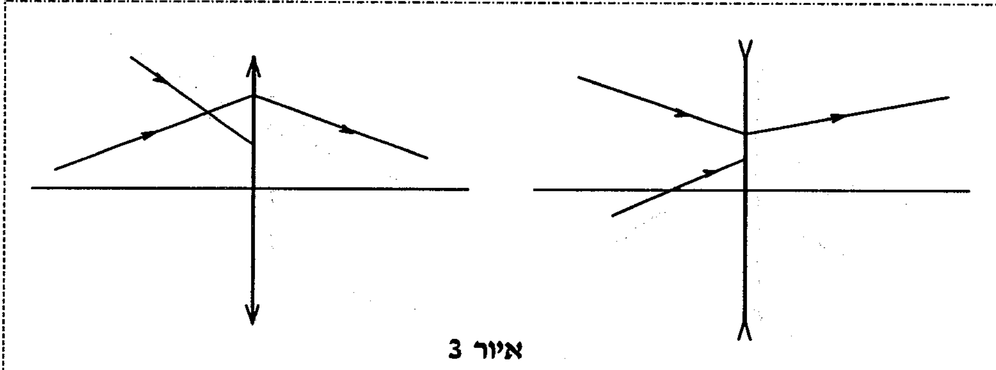

ב
2F
F
F
2F
F
F
איור 1
איור 2
איור 3
S
S
S1
S1
איור 4

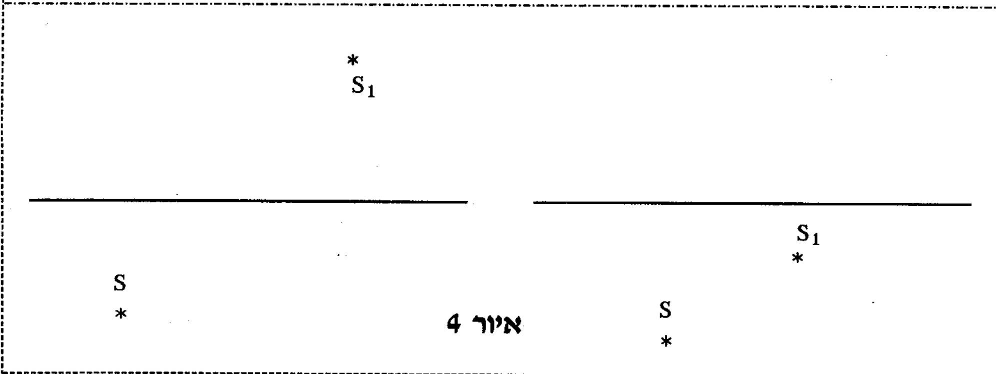
ג



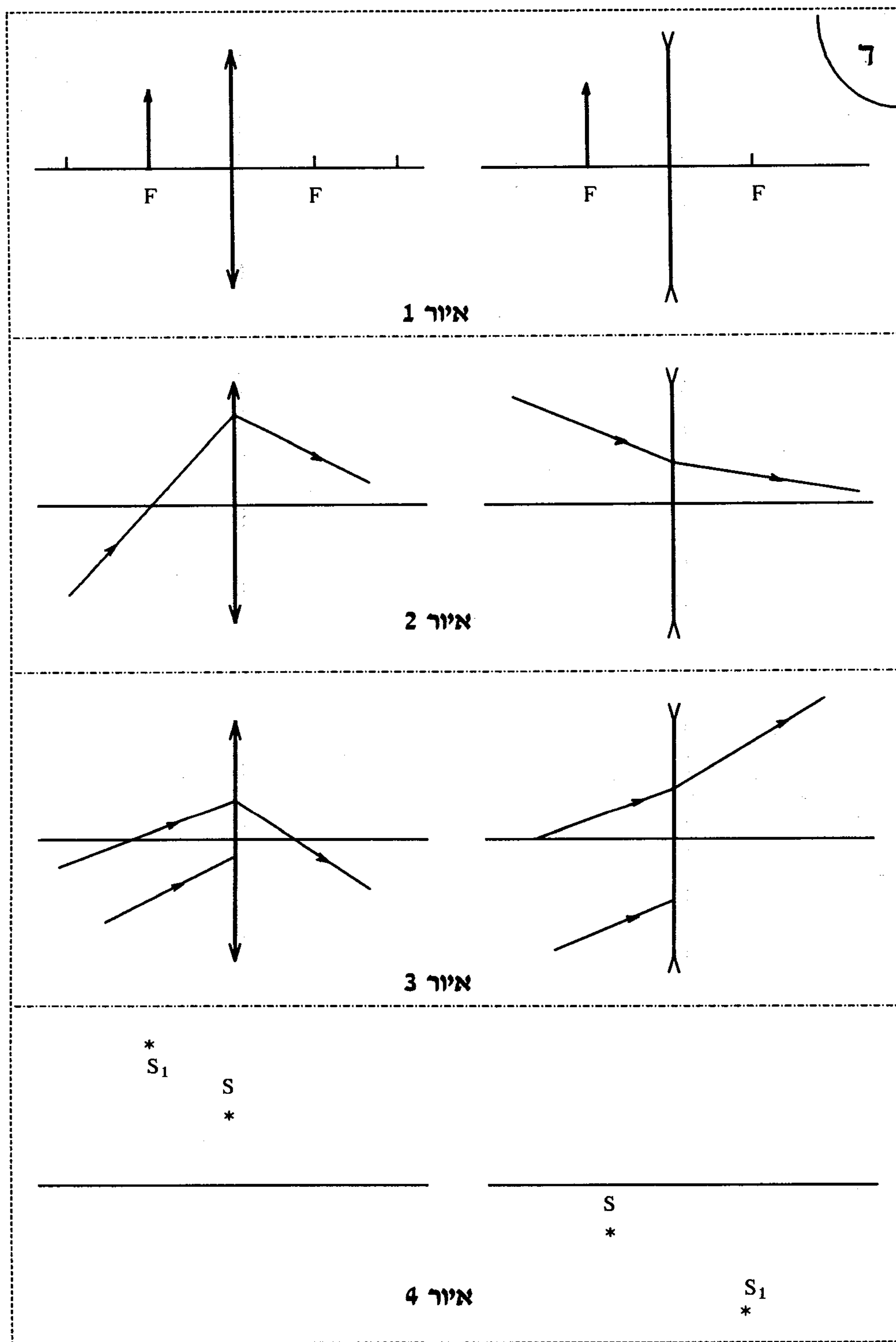
איור 1


איור 2

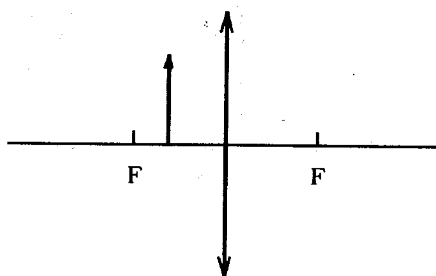

איור 3

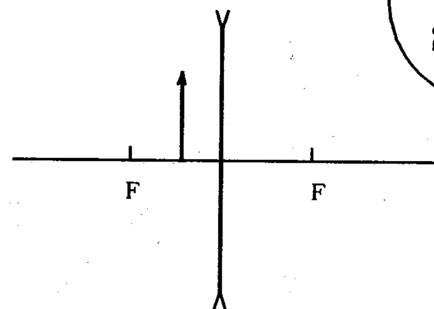


איור 4

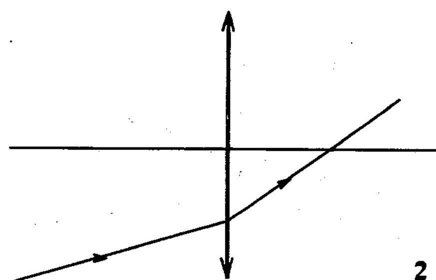

ד
F
F
F
F
איור 1
איור 2
איור 3
S_1
S
S
S_1
איור 4

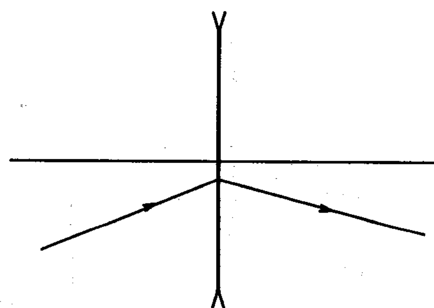
ה



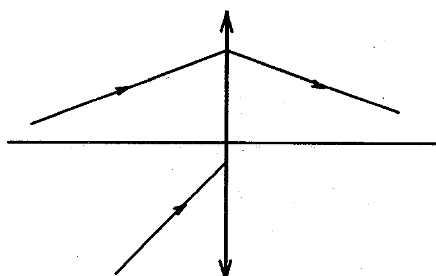


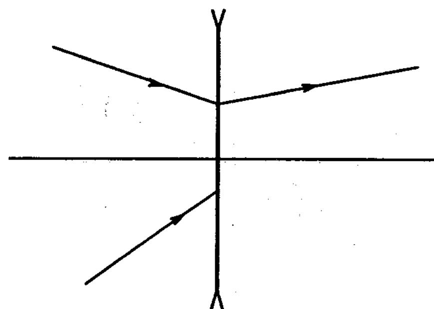
איור 1





איור 2





איור 3

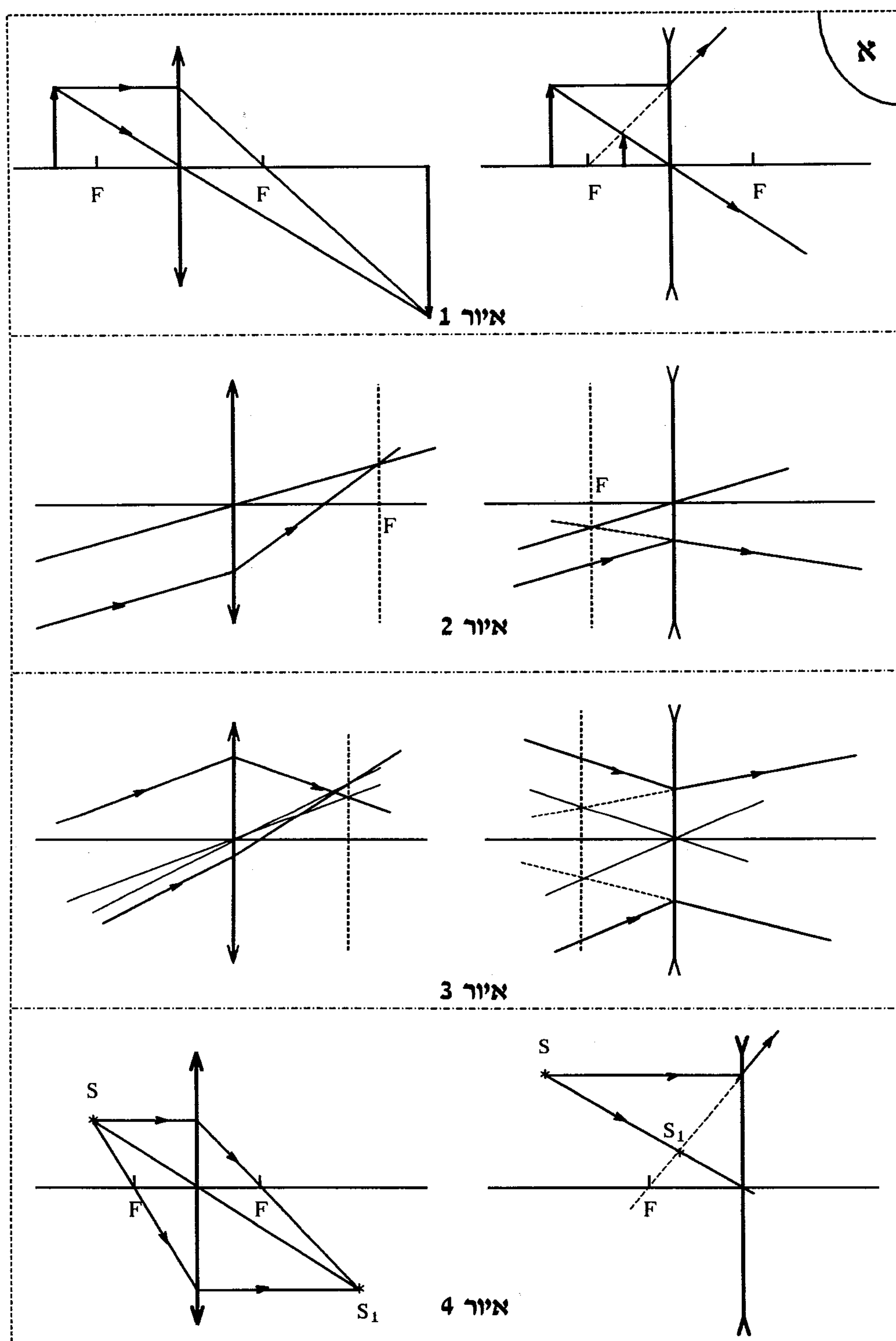
*
S_1

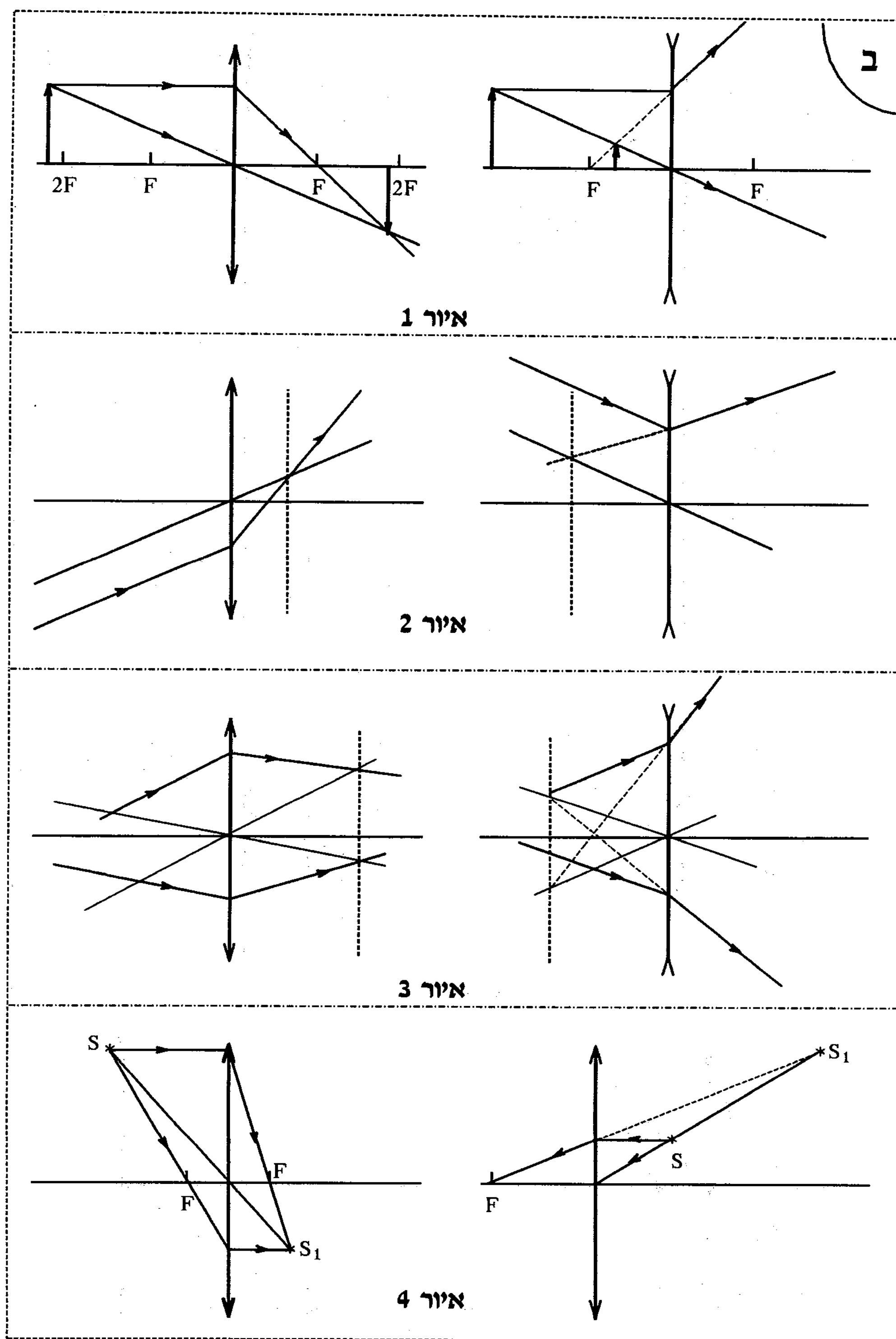
S
*

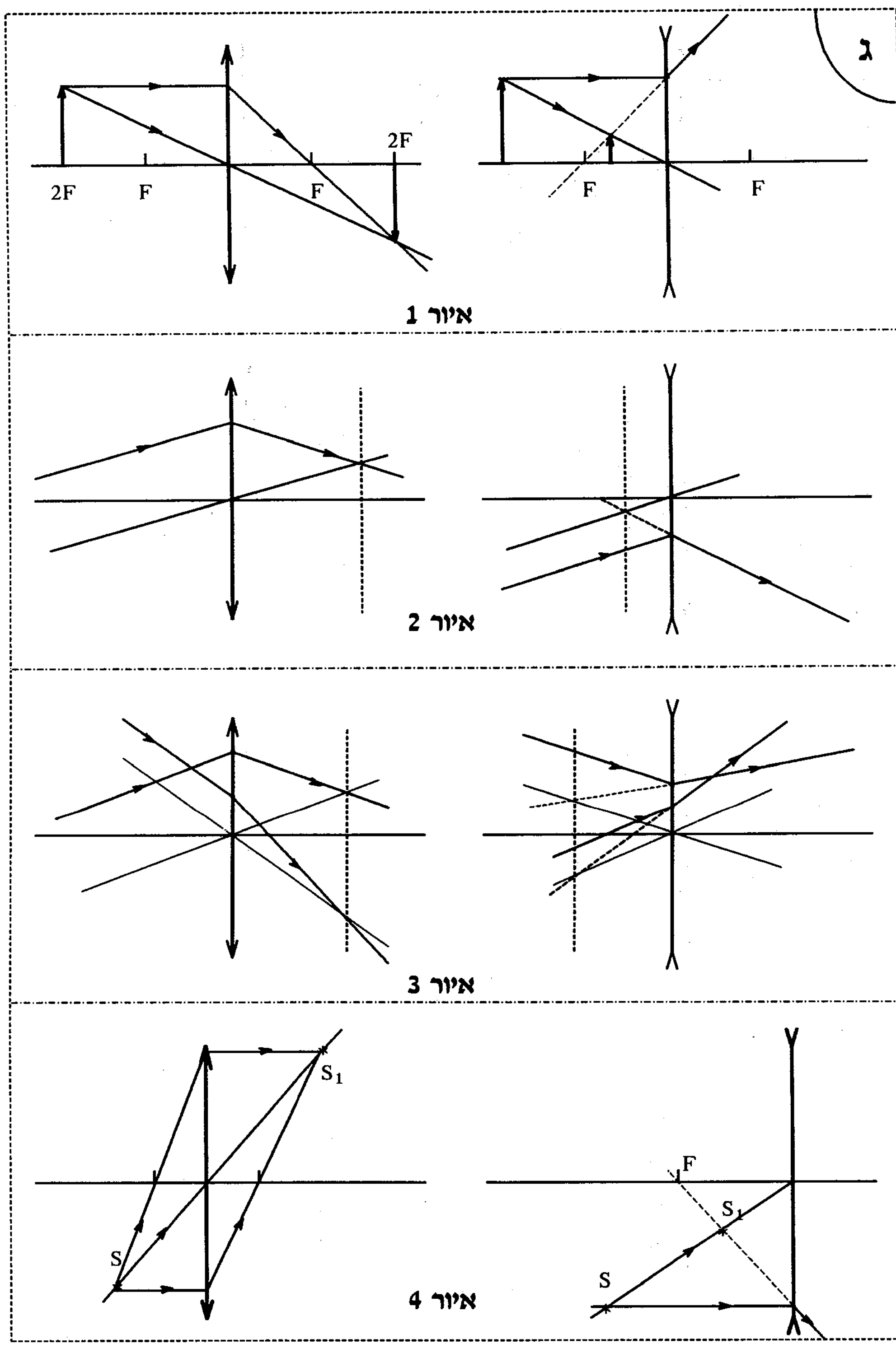
S
*

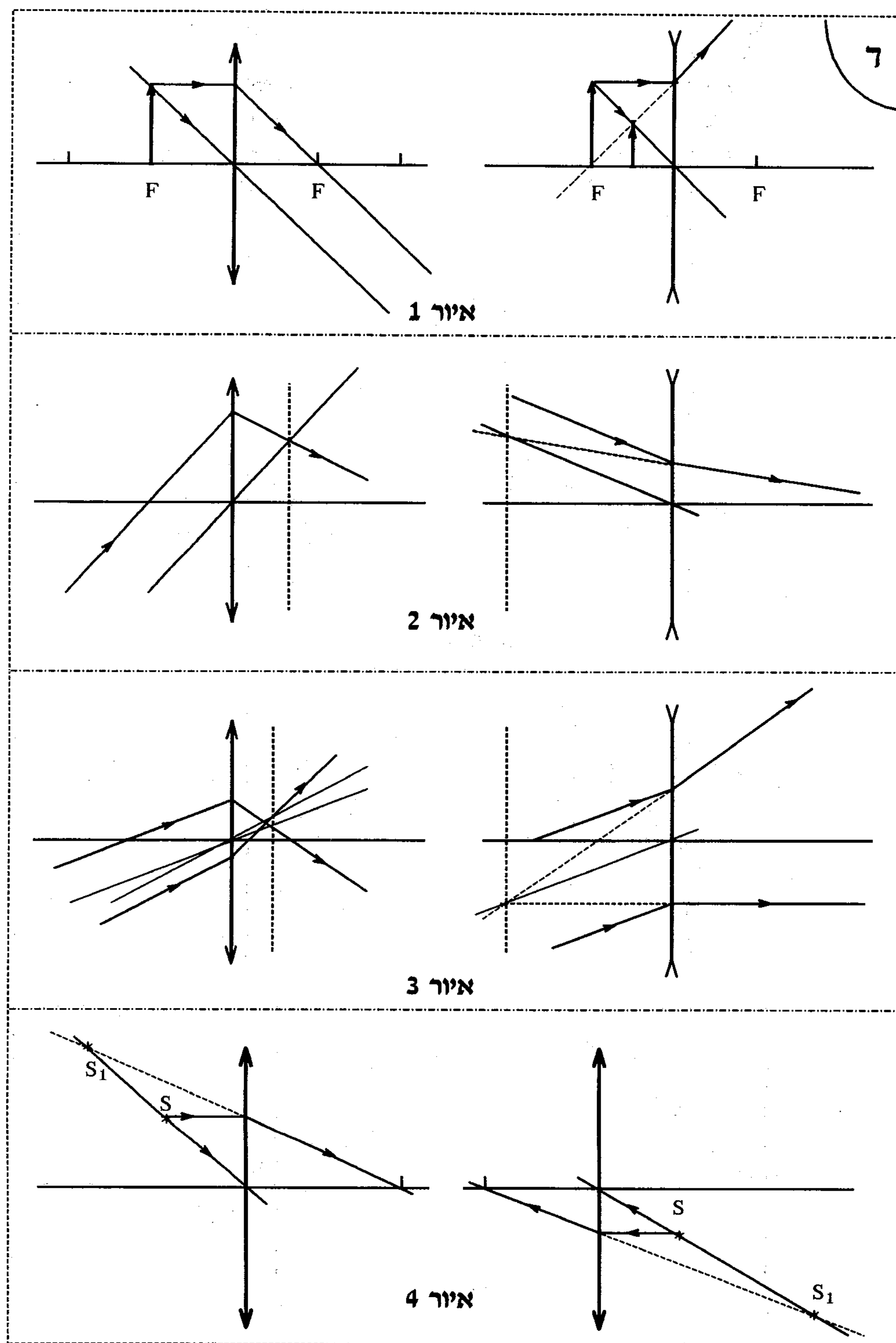
S_1
*

איור 4

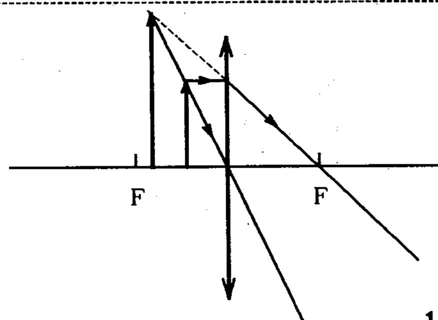

א
F
F
F
F
איור 1
F
F
איור 2
איור 3
S
S
S_1
F
F
S
S_1
F
איור 4

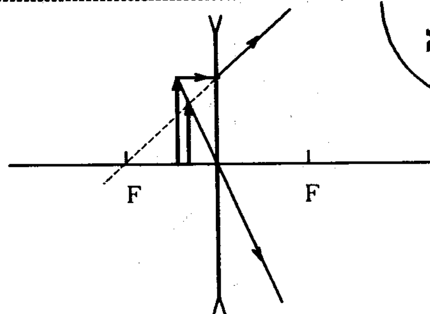

ב
2F
F
F
2F
F
F
איור 1
איור 2
איור 3
S
F
F
S_1
S_1
S
F
איור 4


ג
2F
F
F
2F
F
F
איור 1
איור 2
איור 3
S
S_1
F
S_1
S
איור 4

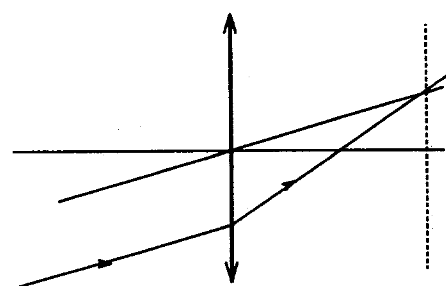

ד
F
F
F
F
איור 1
איור 2
איור 3
S_1
S
S
S_1
איור 4

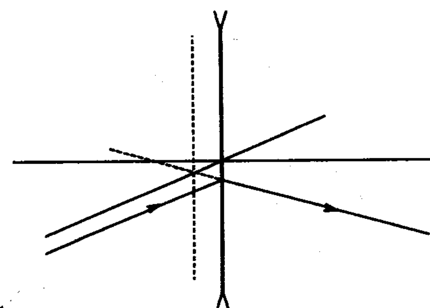
ה



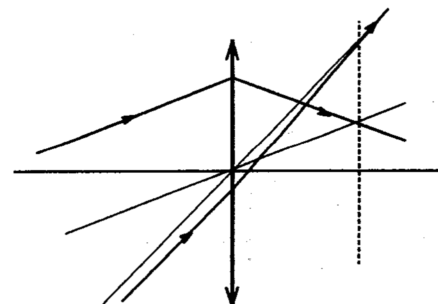


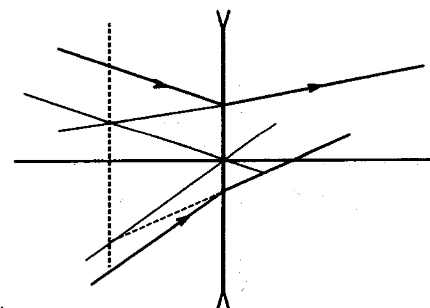
איור 1



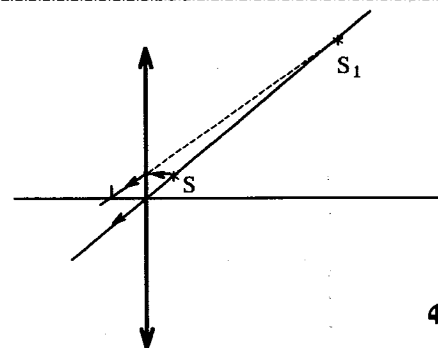


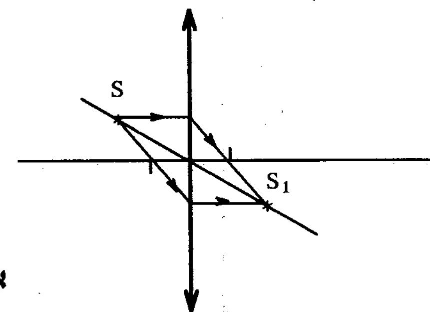
איור 2





איור 3





איור 4

6. עדשה דקה. נוסחת העדשה.

מושגים ונוסחאות עיקריים.

עדשה דקה - עדשה, שעוביה זניח בהשוואה לרדיוסים של המשטחים הכדוריים.

מרחק המוקד - מרחק המוקד מהמרכז האופטי של העדשה.

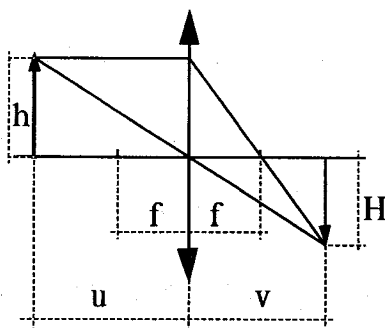
נוסחת העדשה:

f - מרחק המוקד

u - מרחק הגוף מהעדשה

v - מרחק הדמות מהעדשה

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \qquad (1)$$



עוצמת העדשה (נמדדת בדיופטר [diopter]):

f - מרחק המוקד

$$D = \frac{1}{f} \qquad (2)$$

הגדלה קווית של עדשה:

h - גודל הגוף

H - גודל הדמות

$$M = \left|\frac{H}{h}\right| = \left|\frac{v}{u}\right| \qquad (3)$$

בעיה גוף AB נמצא במרחק u מהעדשה המרכזת. הדמות הממשית, המתקבלת בעדשה, נמצאת במרחק v מהעדשה (ראה איור 1).

שאלות

1. חשב את מרחק המוקד של העדשה.
2. חשב את ההגדלה הקווית.
3. חשב את עוצמת העדשה.
4. מזיזים את הגוף ב- x ס"מ. בכמה משתנה המרחק בין הדמות ובין העדשה ?
5. לעדשה הנתונה קיימים שני מקומות, שבהם ההגדלה שווה ל- M. מצא את המקומות האלה.

---

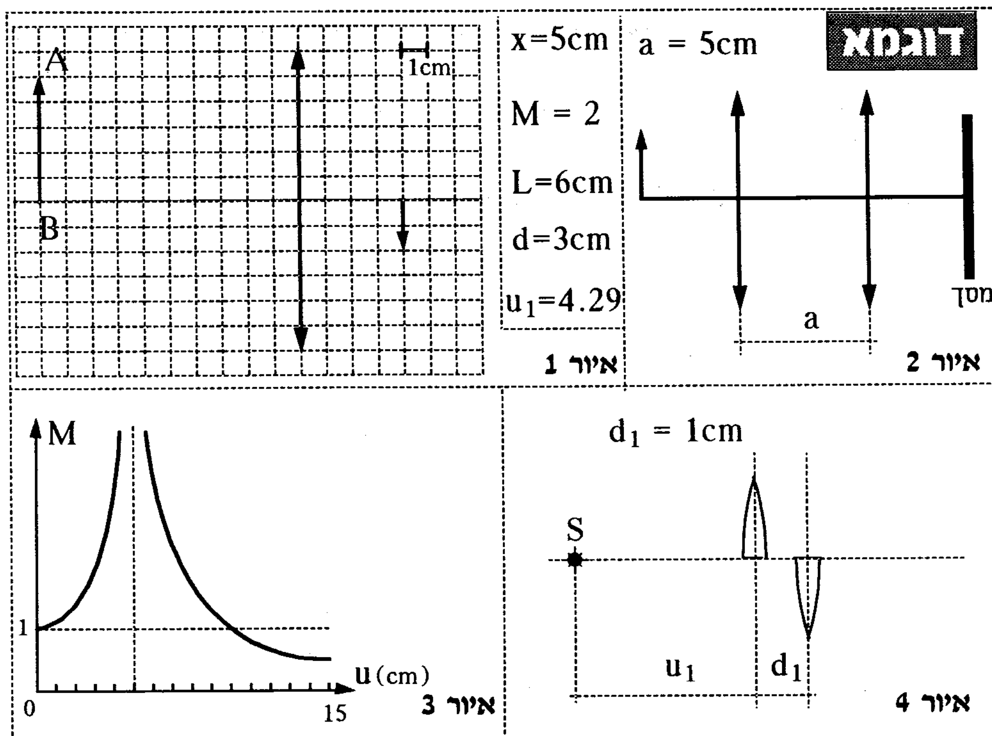
6. במרחק u_1 מהעדשה ממקמים מקור אור נקודתי, ובמרחק L, מצד השני של העדשה, ממקמים מסך. חשב את הקוטר של כתם אור, הנוצר על המסך, אם קוטרה של העדשה הוא d.

7. במרחק u_1 מהעדשה ממקמים מקור אור נקודתי. קבע את המקום, בו יש להציב מקור אור נקודתי אחר, כדי שהדמויות של שני המקורות יהיו במרחקים שווים מהעדשה.

8. במסך נוצרת דמות חדה של מקור אור נקודתי. מזיזים את העדשה בין המסך ובין מקור האור ובמקום מסויים מקבלים שנית את הדמות החדה על המסך. המרחק בין שני המקומות של העדשה שווה ל-a (ראה איור 2). חשב את המרחק בין העדשה לבין מקור האור.

9. מחליפים את העדשה בעדשה מרכזת אחרת. באיור 3 מובא גרף של תלות ההגדלה הקווית במרחק הגוף מהעדשה. קבע את מרחק המוקד של העדשה.

10. העדשה מורכבת משני חלקים בעלי אותה צורה. קבע את המרחק בין הדמויות של מקור אור נקודתי, המתקבלות בשני חלקי העדשה. מיקום החלקים מובא באיור 4.



פתרון

1. מאיור 1 קובעים, שמרחק הגוף מהעדשה הוא: u=10cm, ומרחק הדמות מהעדשה הוא: v=4cm. נציב את הנתונים הללו בנוסחה 1 ונקבל את מרחק המוקד:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \Longrightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{10} + \frac{1}{4} \Longrightarrow f = 2.86\text{cm}$$

2. לפי נוסחה (3), ההגדלה המתקבלת בעדשה היא:

$$M = \left|\frac{v}{u}\right| = \left|\frac{4}{10}\right| = 0.4$$

3. על פי נוסחה (2), עוצמת העדשה היא:

$$D = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.0286m} = 35D$$

4. נתבוננן בשתי אפשרויות:

א) מקרבים את הגוף לעדשה.

נתון: $v = 4cm$, $u' = 5cm$

$f = 2.86cm$

צ"ל: $\Delta v = v - v'$

ב) מרחיקים את הגוף מהעדשה.

נתון: $v = 4cm$, $u' = 15cm$

$f = 2.86cm$

צ"ל: $\Delta v = v - v'$

בהתאם לנוסחה (1), מרחק הדמות מהעדשה הוא:

$$v' = \frac{u'f}{u-f} = \frac{5 \bullet 2.86}{5-2.86} = 6.68cm \qquad v' = \frac{u'f}{u-f} = \frac{15 \bullet 2.86}{15-2.86} = 3.53cm$$

השינוי במרחק של הדמות מהעדשה הוא:

$$\Delta v = 4cm - 6.68cm = -2.68cm \qquad \Delta v = 4cm - 3.53cm = 0.47cm;$$

סימן "-" במקרה "א" מראה שהדמות מתרחקת מהעדשה.

5. על פי נוסחה (3), ההגדלה המתקבלת בעדשה היא: $M = \left|\frac{v}{u}\right|$. לפי נוסחה 1, מרחק הדמות מהעדשה הוא:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \Rightarrow v = \frac{uf}{u-f}$$

נציב את הביטוי עבור v בנוסחה להגדלה, ונקבל: $M = \left|\frac{f}{u-f}\right|$. לפי תנאיי הבעיה, $M = 2$. מהמשוואה $\left|\frac{f}{u-f}\right| = 2$ מקבלים שני ערכים למרחק הגוף מהעדשה:

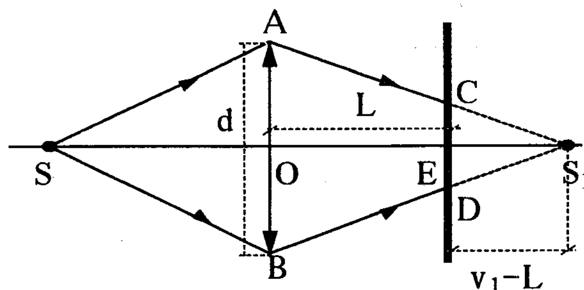
$u_1 = 4.29cm$ ו-$u_2 = 1.43cm$.

6. באיור למטה מובא מהלך קרניים שעוברות דרך קצוות העדשה ומתרכזות בנקודה S_1 (כלומר, בנקודה זו נמצאת הדמות של מקור האור). את המרחק v_1 העדשה מהדמות נחשב על פי נוסחה (1):

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{u_1}+\frac{1}{v_1} \Rightarrow v_1=\frac{u_1 f}{u_1-f}=\frac{4.29cm \bullet 2.86cm}{4.29cm-2.86cm}=8.58cm$$

מסך נמצא במרחק קטן יותר ממרחק הדמות מהעדשה, ולכן נתקבל עליו כתם אור שקוטרו CD. משולשים ABS_1 ו-CDS_1 הם משולשים דומים. מכאן:

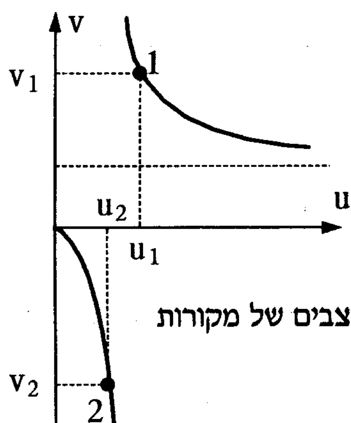
$$\frac{|AB|}{|CD|}=\frac{|OS_1|}{|ES_1|} \Rightarrow \frac{d}{|CD|}=\frac{v_1}{v_1-L} \Rightarrow |CD|=\frac{d(v_1-L)}{v_1}=0.9cm$$



7. נעיין בגרף המתאר את התלות $v=f(u)$.

הגרף מראה, שקיימות שתי נקודות 1 ו-2 בהן מרחקי הדמות מהעדשה שווים (כלומר $v_1=|v_2|$).

הדמות שנוצרת בנקודה 1 היא דמות ממשית. בנקודה 2 נוצרת דמות מדומה. נרשום את הנוסחה (1) עבור שני המצבים של מקורות האור:



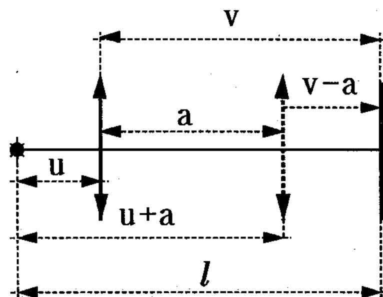
$$\frac{1}{f}=\frac{1}{u_1}+\frac{1}{v_1}$$

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{u_2}-\frac{1}{v_2}$$

המערכת האחרונה גוררת:

$$u_2 = \frac{u_1 \bullet f}{2u_1 - f} = \frac{4.29cm \bullet 2.86cm}{2 \bullet 4.29cm - 2.86cm} = 2.145cm.$$

8. נסמן ב- u את מרחק המקור מהעדשה וב- v את מרחק הדמות מהעדשה במצב ההתחלתי. לאחר הזזה, מרחק המקור מהעדשה הוא $(u+a)$ ומרחק הדמות מהעדשה הוא $(v-a)$ (ראה איור).

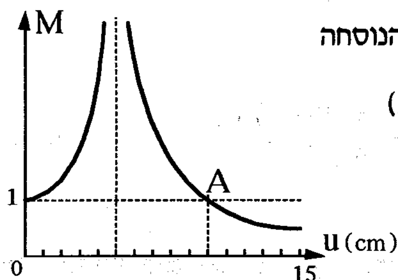


מאחר ו- $u+v=l$, נוסחת העדשה בשני המקרים, בהם מתקבלת דמות חדה על המסך, תירשם כך:

$$\begin{cases} \frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{l-u} \\ \frac{1}{f} = \frac{1}{u+a} + \frac{1}{l-u-a} \end{cases}$$

מערכת המשוואות שנתקבלה גוררת:

$$l = 2f + \sqrt{4f^2 + a^2} = 13.32cm$$

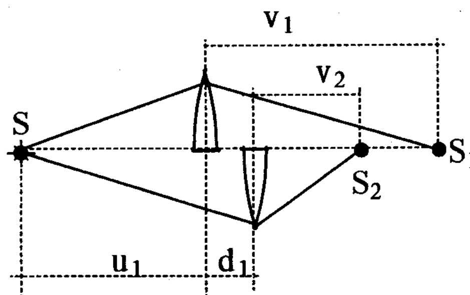


9. הגרף מראה, שבנקודה A ההגדלה שווה ל-1. מהנוסחה (3) נובע, שאם $M = 1$, אז $u=v$. נציב בנוסחה (1) את u במקום v ונקבל: $u=2f$.

מהגרף קובעים ש: $u_A = 10cm$ ולכן $f=5cm$.

10. חלק של עדשה פועל כמו עדשה שלמה. כלומר, דמות הנוצרת על ידי חלק של העדשה נמצאת באותו מקום, בו היתה ממוקמת, אילו העדשה היתה שלמה.

ההבדל יחיד הוא בכך, שהארת הדמות הנוצרת על ידי חלק של העדשה קטנה יותר מאשר הארת הדמות הנוצרת על ידי עדשה שלמה. מיקום הדמויות הנוצרות על ידי שני חלקי העדשה מובא באיור:



השרטוט מראה, שמרחק המבוקש הוא:

$$|S_1S_2| = v_1 - d_1 - v_2$$

הנוסחה (1) מנביעה לגבי שני חלקי העדשה:

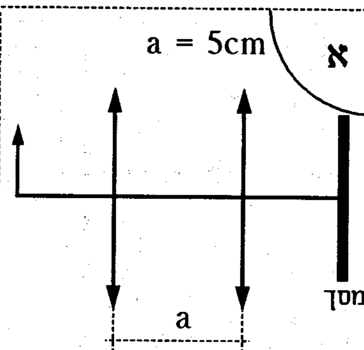
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u_1} + \frac{1}{v_1} \Rightarrow v_1 = \frac{u_1 f}{u_1 - f} = \frac{4.29 \bullet 2.86}{4.29 - 2.86} = 8.58\text{cm}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u_1 + d_1} + \frac{1}{v_2} \Rightarrow v_2 = \frac{(u_1 + d_1) \bullet f}{u_1 + d_1 - f} = \frac{(4.29+1) \bullet 2.86}{4.29+1-2.86} = 6.23\text{cm}$$

נציב את הערכים של v_1 ו- v_2 בביטוי עבור המרחק בין שתי הדמויות ונקבל:

$$|S_1S_2| = 8.58\text{cm} - 1\text{cm} - 6.23\text{cm} = 1.35\text{cm}$$

א



איור 2

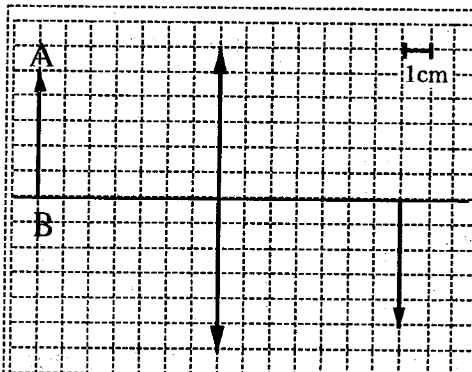
x =2cm

M=1.5

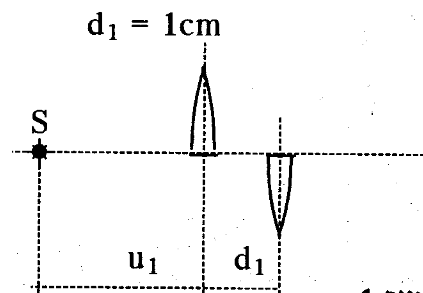
L=7cm

d=2cm

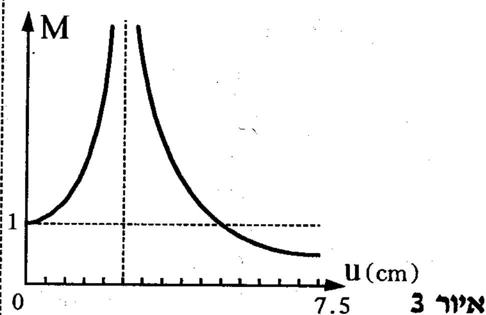
u_1=4.9



איור 1

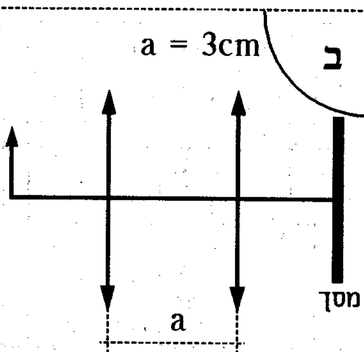


איור 4



איור 3

ב



איור 2

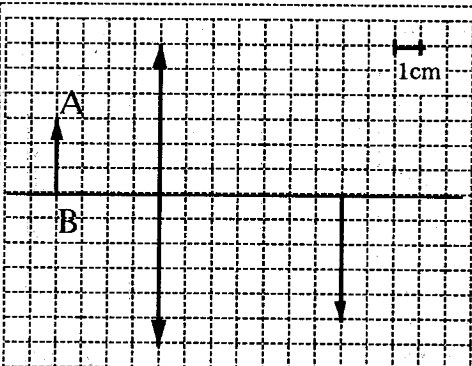
x=1cm

M=3

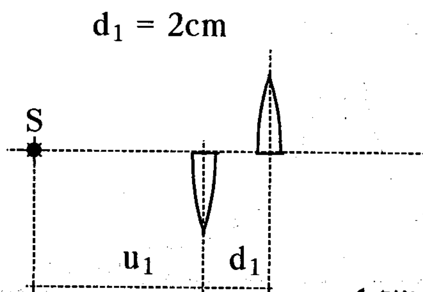
L=3cm

d=3cm

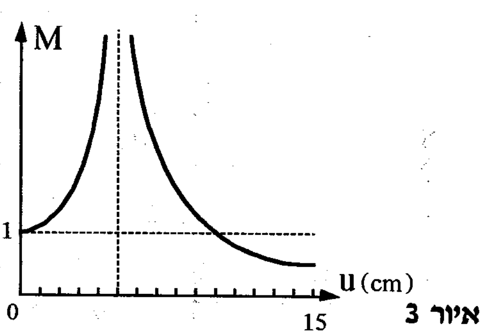
u_1=8cm



איור 1



איור 4



איור 3

ג

x=4cm
M=2
L=2cm
d=4cm
u_1=15

1cm
A
B

איור 1

a = 5cm
a
מסך

איור 2

M
1
0
30
u (cm)

איור 3

d_1 = 1cm
S
d_1
u_1

איור 4

ד

x=1cm
M=2.5
L=1cm
d=2.5
u_1=20

1cm
A
B

איור 1

a = 4cm
a
מסך

איור 2

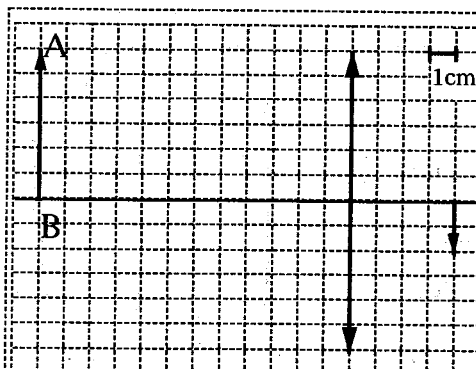
M
1
0
45
u (cm)

איור 3

d_1 = 2cm
S
d_1
u_1

איור 4

ה



x=6cm

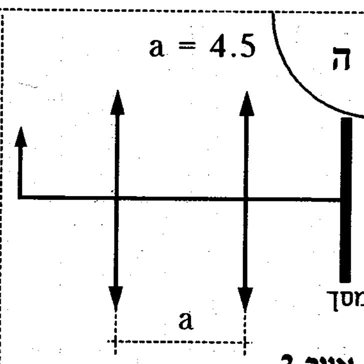
M=3

L=3cm

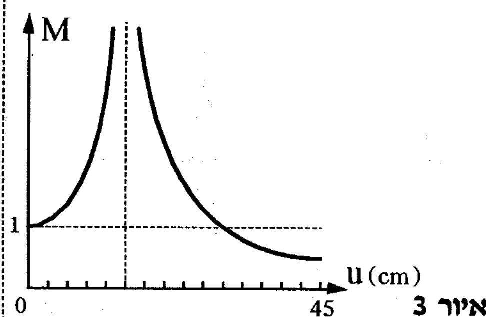
d=3.5

u_1=20

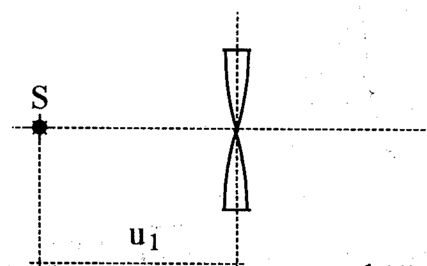
איור 1



איור 2

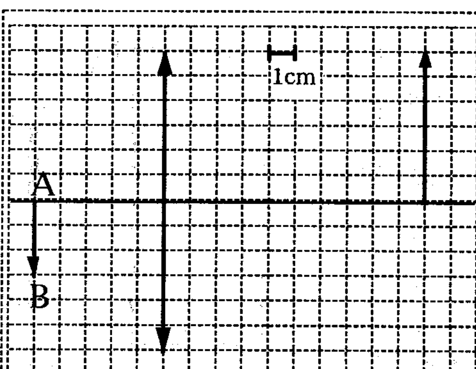


איור 3



איור 4

ו



x=0.5cm

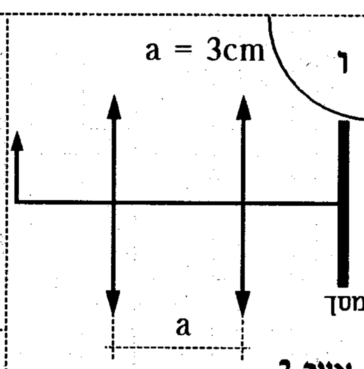
M=4

L=2cm

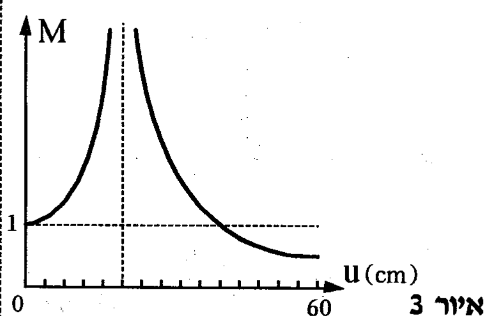
d=4.5cm

u_1=25cm

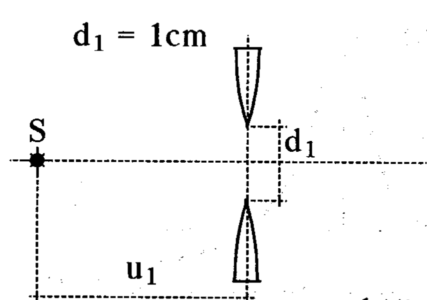
איור 1



איור 2

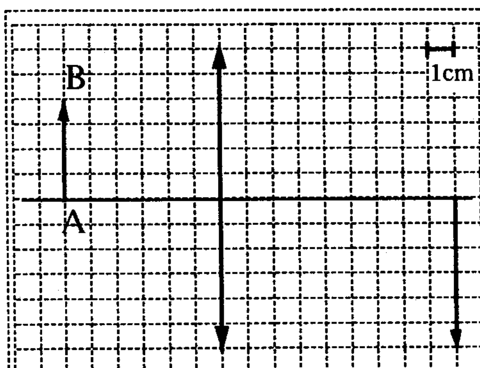


איור 3



איור 4

ז



x=2.4cm

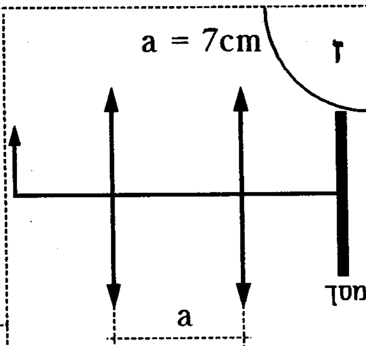
M=1.5

L=10cm

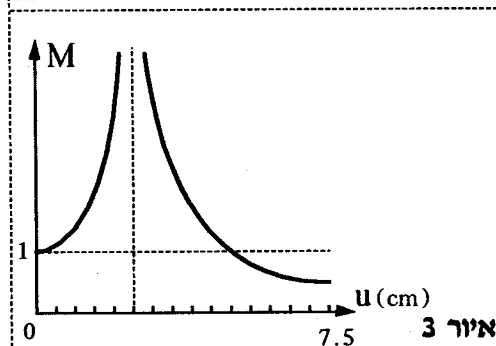
d=5cm

u_1=8cm

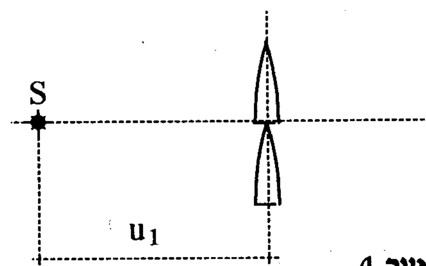
איור 1



איור 2

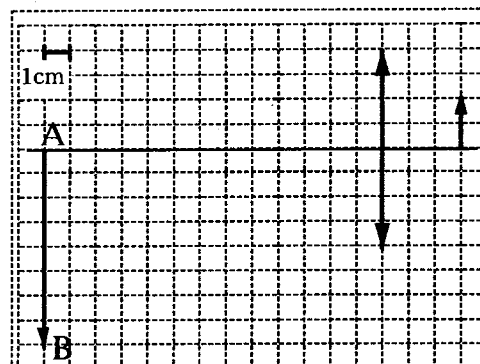


איור 3



איור 4

ח



x=12cm

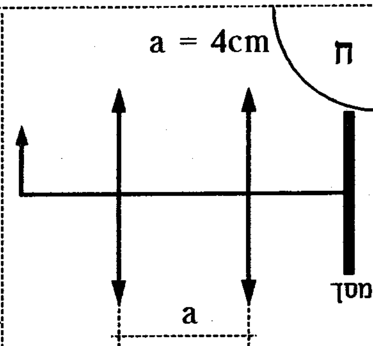
M=3.5

L=5cm

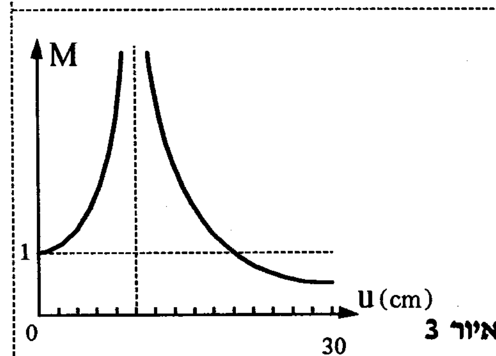
d=1cm

u_1=15

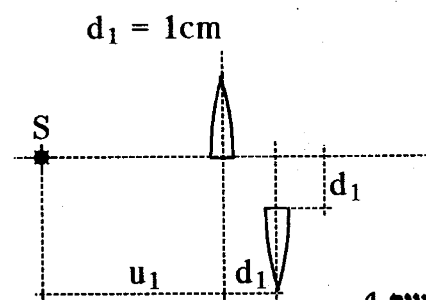
איור 1



איור 2



איור 3



איור 4

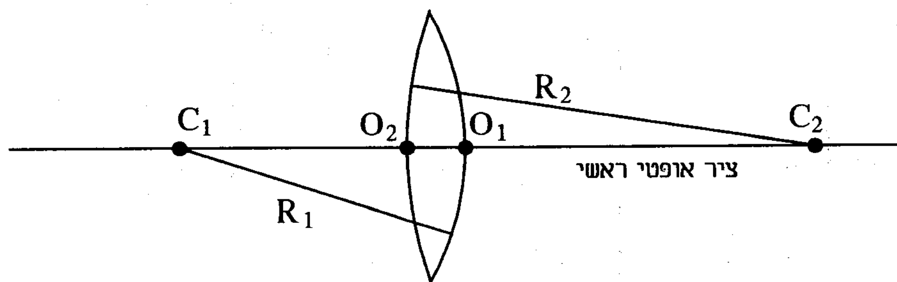
דף תשובות לסדרה "עדשה דקה. נוסחת העדשה"

$\lvert S_1S_2 \rvert$	f	l	u_2	$\lvert CD \rvert$	u	Δv	D	M	f	
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	D		cm	
2.65	2.5	15.6	2.72	0.43	1.17 5.83	1.27 −4.7	28.6	1.0	3.50	א
1.68	5.0	11.0	1.52	0.59	1.7 3.4	1.80 −10	39.2	1.75	2.55	ב
1.23	10	13.3	1.58	1.74	1.43 4.29	0.41 −1.5	35.0	0.40	2.86	ג
2.31	15	12.0	1.43	1.69	1.60 3.74	2.27 −16.3	37.5	2.0	2.67	ד
4.12	15	13.5	1.62	0.52	2.0 4.0	0.40 −2.0	33.3	0.33	3.0	ה
6.34	20	14.0	1.78	2.16	2.5 4.16	1.56 −2.8	30.0	2.0	3.33	ו
4.55	2.5	17.2	2.32	2.63	1.2 6.0	2.70 −∞	27.8	1.5	3.60	ז
1.52	10	11.2	1.33	0.72	1.74 3.14	0.30 4.69	41.0	0.23	2.44	ח

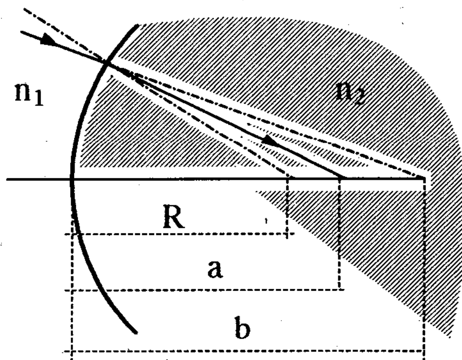
7. עדשה דקה. נוסחת מרחק המוקד.

מושגים ונוסחאות עיקריים.

עדשה - גוף שקוף המוגבל על ידי שני משטחים עקומים (משטחים כדוריים, לרוב).



נוסחה לשבירת האור במשטח כדורי:



$$\frac{n_1}{b} - \frac{n_2}{a} = \frac{n_1 - n_2}{R} \quad (1)$$

מרחק המוקד של עדשה:

f - מרחק המוקד

n_1 - מקדם השבירה של החומר מחוץ לעדשה

n_2 - מקדם השבירה של חומר העדשה

R_1, R_2 - רדיוסים של המשטחים הכדוריים

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad (2)$$

בעיה עדשה עשוייה מחומר עבורו מקדם השבירה הוא n ורדיוסים העיקום שלה הם R_1 ו-R_2 (איור 1).

באיור 2 נתון גרף התלות של מרחק הדמות מהעדשה במרחק הגוף מהעדשה.

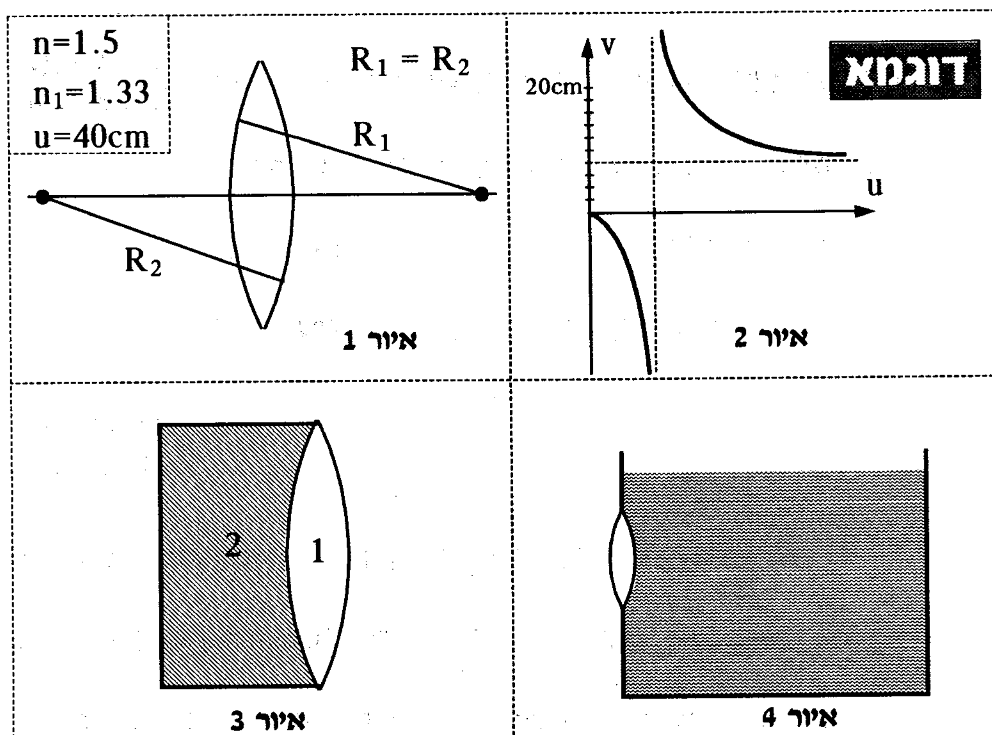
שאלות

1. קבע מתוך הגרף את מרחק המוקד של העדשה.
2. חשב את הרדיוסים של משטחי העדשה.
3. באיור 3 מתוארת עדשה 2, העשוייה מחומר עבורו מקדם השבירה n. חשב את מרחק המוקד ואת עוצמתה של עדשה 2.
4. לפני עדשה 1 ממקמים גוף במרחק u מהעדשה. חשב את מרחק הדמות מהעדשה.
5. מכניסים את המערכת "גוף-עדשה" לתוך נוזל עבורו מקדם השבירה הוא n_1. חשב בכמה משתנה מרחק הדמות מהעדשה.

---

6. מרכיבים את העדשה בתוך דופן של אקווריום מלא מים (ראה איור 4). חשב באיזה מרחק מהעדשה מתרכזת אלומת קרניים מקבילות המתפשטת:

א) לתוך האקווריום. ב) מתוך האקווריום.



פתרון

1. מהנוסחה (1) של הסדרה הקודמת (עמוד 75) נקבל את הביטוי עבור מרחק הדמות מהעדשה כפונקציה של מרחק הגוף מהעדשה:

$$v = f(u) = \frac{uf}{u-f}.$$

לפונקציה $v=f(u)$ יש שתי אסימפטוטות: אחת אנכית בנקודה $u=f$ והשנייה אופקית, שמשוואתה היא $v(u) = f$. המשמעות הפיזיקלית של האסימפטוטה האנכית היא: המצאות הגוף במוקד העדשה מונעת קיום הדמות שלה ($v = \infty$).

המשמעות הפיזיקלית של האסימפטוטה האופקית היא: התרחקות הגוף מהעדשה מקרבת את דמותו למוקד.

מהגרף שבאיור 2 נובע, שמרחק המוקד של העדשה הוא 8 סנטימטר.

2. בהתאם לנוסחה (2), מרחק המוקד של העדשה הנתונה הוא:

$$\frac{1}{f} = (\frac{n}{n_{\text{אוויר}}} - 1)(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})$$

מאחר ו- $R_1 = R_2$ ו- $n_{\text{אוויר}}=1$, השיוויון האחרון גורר:

$$\frac{1}{f} = (n-1)(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1}) = (n-1)\bullet\frac{2}{R_1}$$

מכאן:

$$f = \frac{R_1}{2(n-1)} \implies R_1 = 2f(n-1) = 2\bullet 8cm\bullet(1.5-1) = 8cm$$

3. לעדשה 2 שני משטחים: מישורי (עבורו ה"רדיוס" אינסופי: $R_1=\infty$, $\frac{1}{R_1}=0$)

והשני - כדורי בעל רדיוס $R_2 = 8cm$.

נציב את הנתונים לעיל בנוסחה (2) ונקבל:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\bullet(0 - \frac{1}{R_2}) = -\frac{(n-1)}{R_2} \implies f = -\frac{R_2}{(n-1)} = -16cm$$

4. בהתאם לנוסחה (1) מעמוד 75, מרחק הדמות מהעדשה הוא:

$$v = \frac{uf}{u-f} = \frac{40cm\bullet 8cm}{40cm-8cm} = 10cm$$

5. אם נכניס את העדשה לתוך חומר, בעל מקדם השבירה השונה ממקדם השבירה של האוויר, מרחק המוקד של העדשה ישתנה. בהתאם לנוסחה (2), מרחק המוקד החדש (עדשה בנוזל) הוא:

$$\frac{1}{f_1} = (\frac{n}{n_1} - 1)\frac{2}{R_1} \implies f_1 = \frac{R_1\bullet n_1}{2\bullet(n-n_1)} = \frac{8cm\bullet 1.33}{2\bullet(1.5-1.33)} = 31.29cm$$

נציב את מרחק המוקד החדש בביטוי עבור מרחק הדמות מהעדשה (ראה פיתרון לשאלה 4) ונחשב את v_1:

$$v_1 = \frac{uf_1}{u-f_1} = \frac{40cm \bullet 31.29cm}{40cm-31.29cm} = 143.70cm$$

השינוי במרחקים בין הדמויות בשני המקרים (עדשה באוויר ועדשה בנוזל) הוא:

$$\Delta v = v_1 - v = 143.7cm - 10cm = 133.7cm$$

6. נעיין בעדשה כבשני משטחים כדוריים ונשתמש בנוסחה 1 לשני המשטחים בנפרד:

עבור המשטח הראשון:

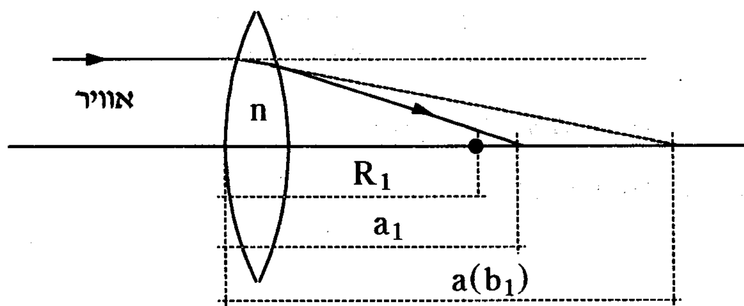
$$\frac{n_{\text{אוויר}}}{b} - \frac{n}{a} = \frac{n_{\text{אוויר}}-n}{R_1}$$

מאחר ומרחק b הוא אינסופי ו- $n_{\text{אוויר}} = 1$, נקבל עבור a: $a = \frac{nR_1}{n-1}$.

עבור המשטח השני:

$$\frac{n}{b_1} - \frac{n_{\text{מים}}}{a_1} = \frac{n-n_{\text{מים}}}{R_2}$$

איור למטה מראה כי $b_1 = a$,



לקביעת המרחק הנדרש, נציב את ביטוי עבור a בביטוי עבור המשטח השני ונקבל:

$$a_1 = \frac{n_{\text{מים}} R_1 R_2}{R_1(n-n_{\text{מים}})+R_2(n-1)}$$

נציב את הנתונים $n=1.5$, $n_{\text{מים}}=1.33$, $R_1=R_2=8cm$ ונרשום:

$$a_1 = \frac{R_1 \bullet n_{\text{מים}}}{2n-n_{\text{מים}}-1} = \frac{8cm \bullet 1.33}{2 \bullet 1.5-1.33-1} = 15.88cm$$

להתרת החלק השני של התרגיל, נרשום באופן דומה את הנוסחת (1) לשני המשטחים,

נבטא את a מהשיוויון הראשון, נציב הביטוי המתקבל בשיוויון השני ונקבל ביטוי

עבור המרחק הנדרש:

עבור המשטח הראשון:

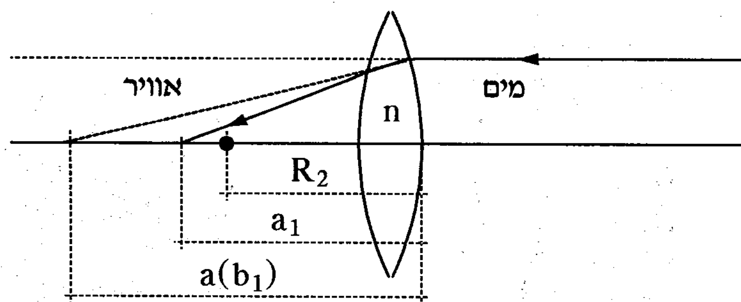
$$\frac{n_{\text{מים}}}{b} - \frac{n}{a} = \frac{n_{\text{מים}}-n}{R_2} \Longrightarrow a = \frac{nR_2}{n_{\text{מים}}-n}$$

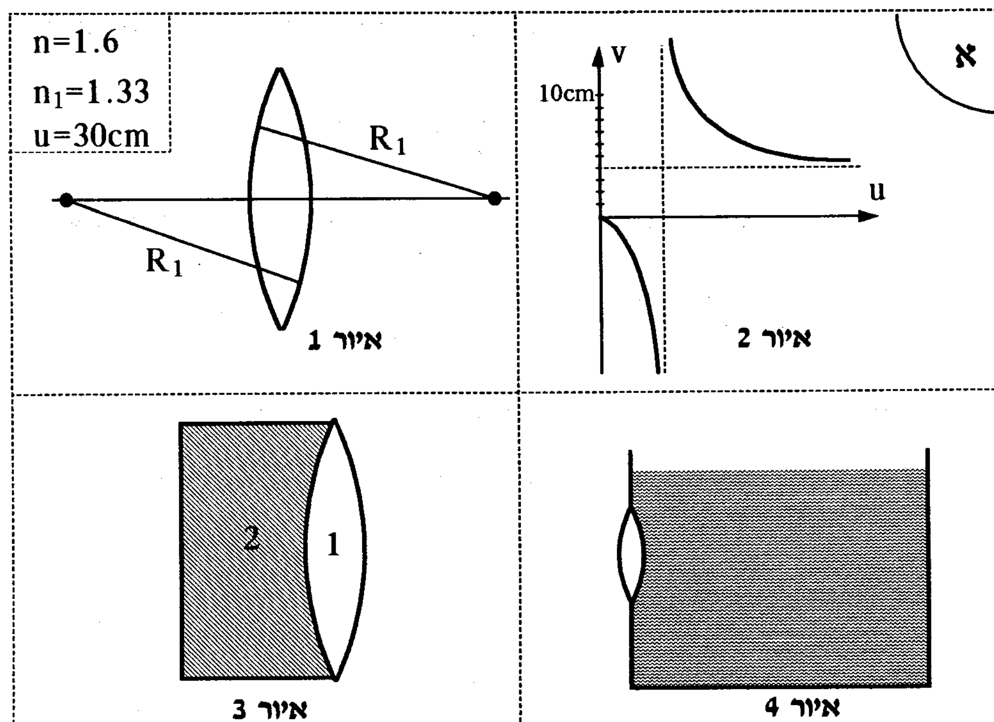
עבור המשטח השני:

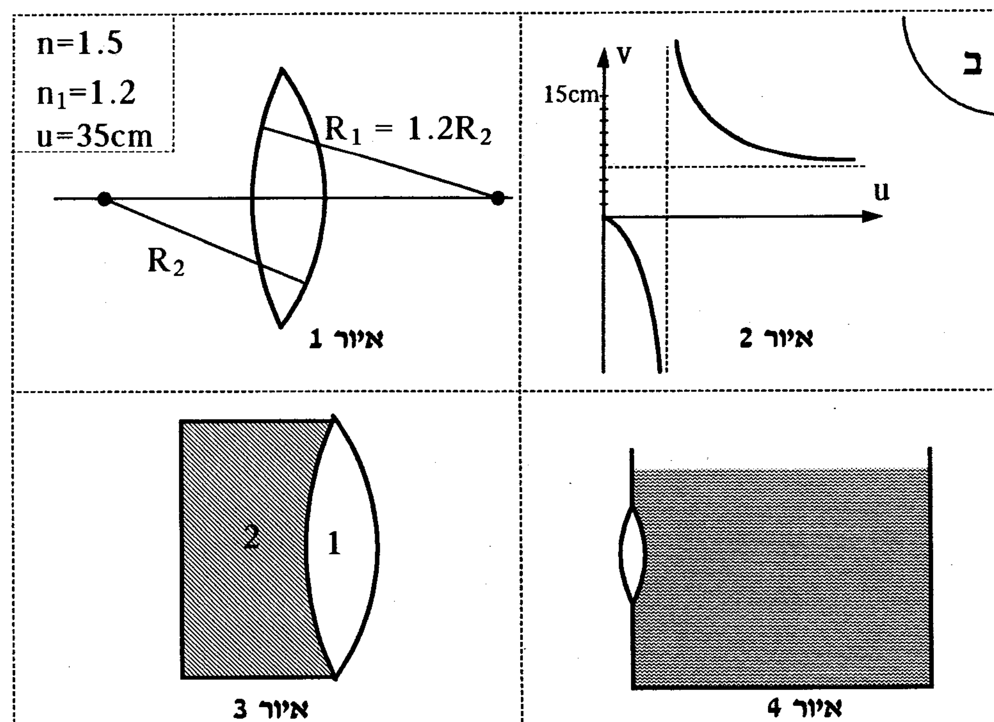
$$\frac{n}{b_1} - \frac{n_{\text{אוויר}}}{a_2} = \frac{n-n_{\text{אוויר}}}{-R_1}$$

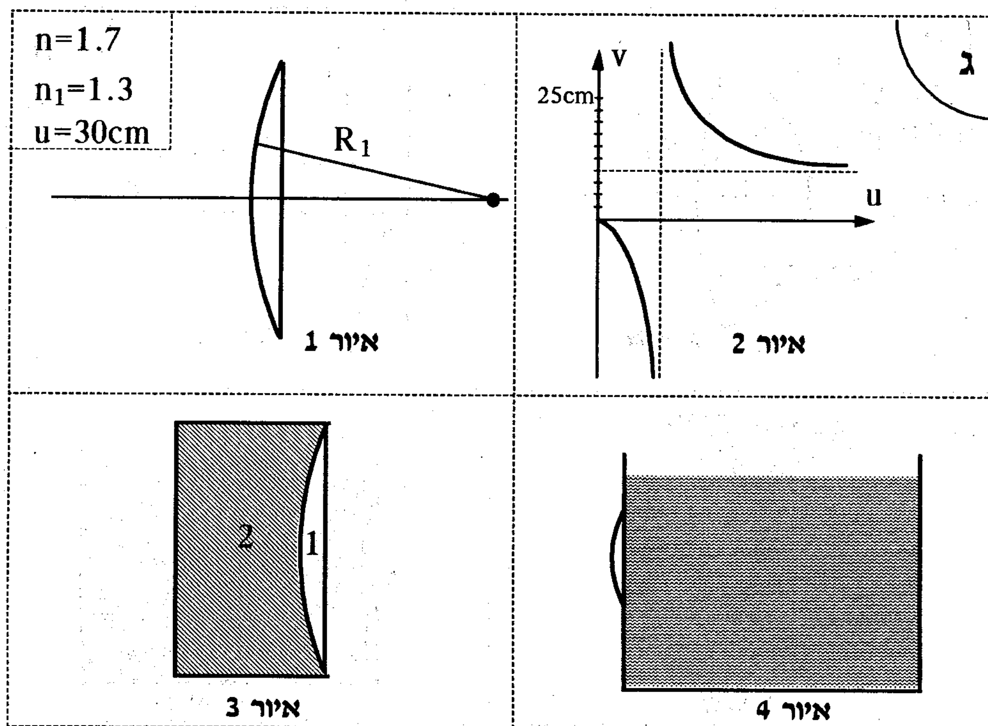
מכאן:

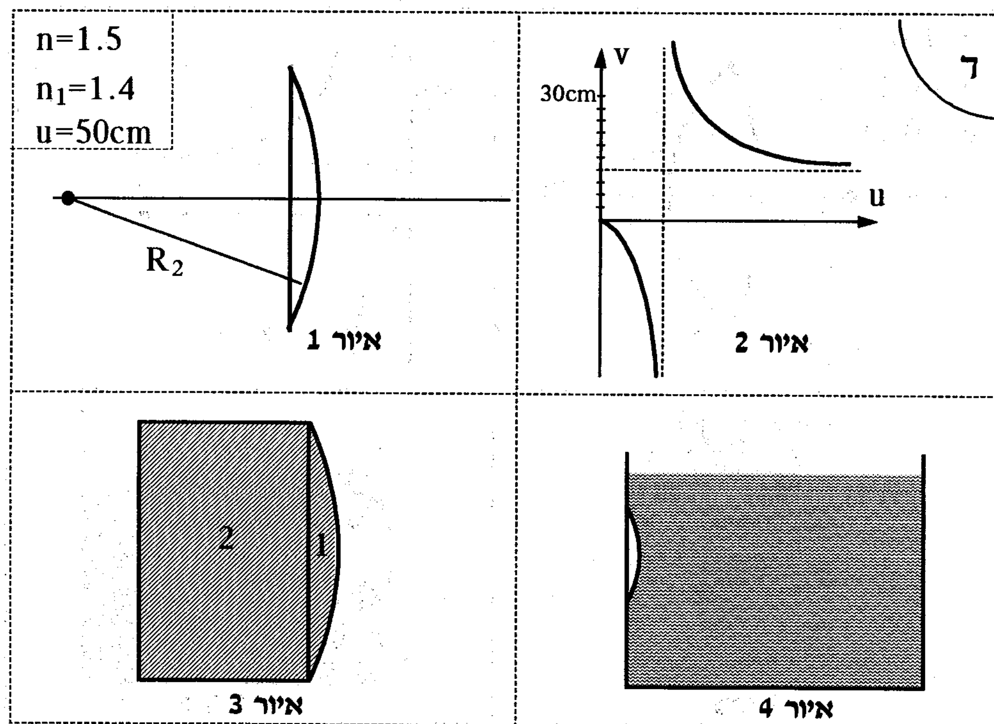
$$a_2 = \frac{R_1 R_2}{R_2(n-1)+R_1(n-n_{\text{מים}})} \Longrightarrow a_2 = \frac{R_1}{2n-n_{\text{מים}}-1} = 11.94cm$$

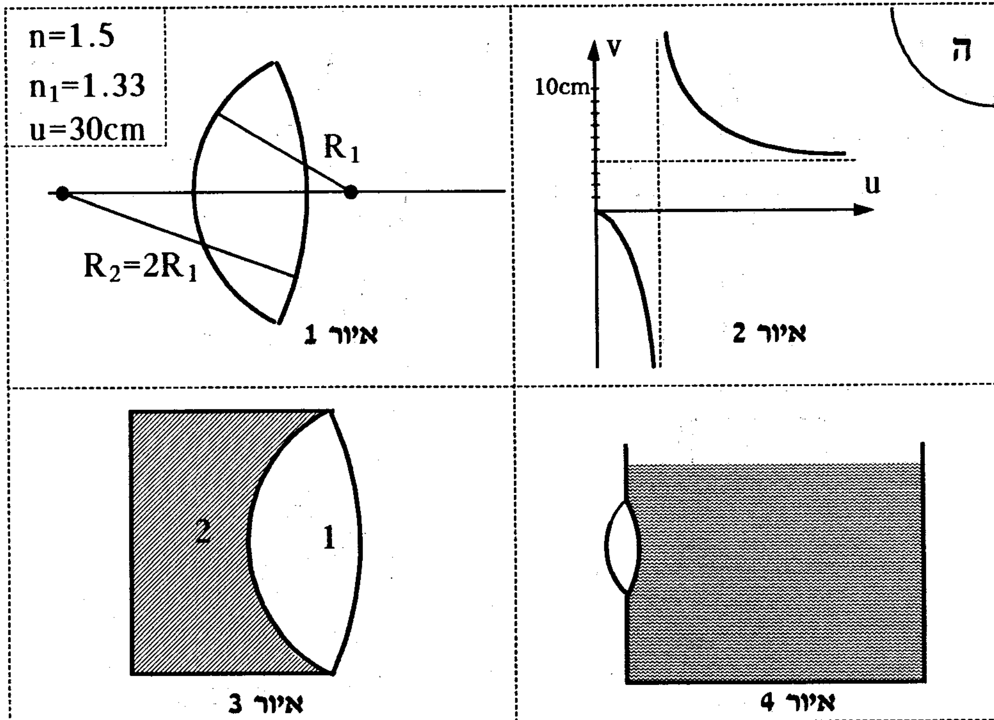


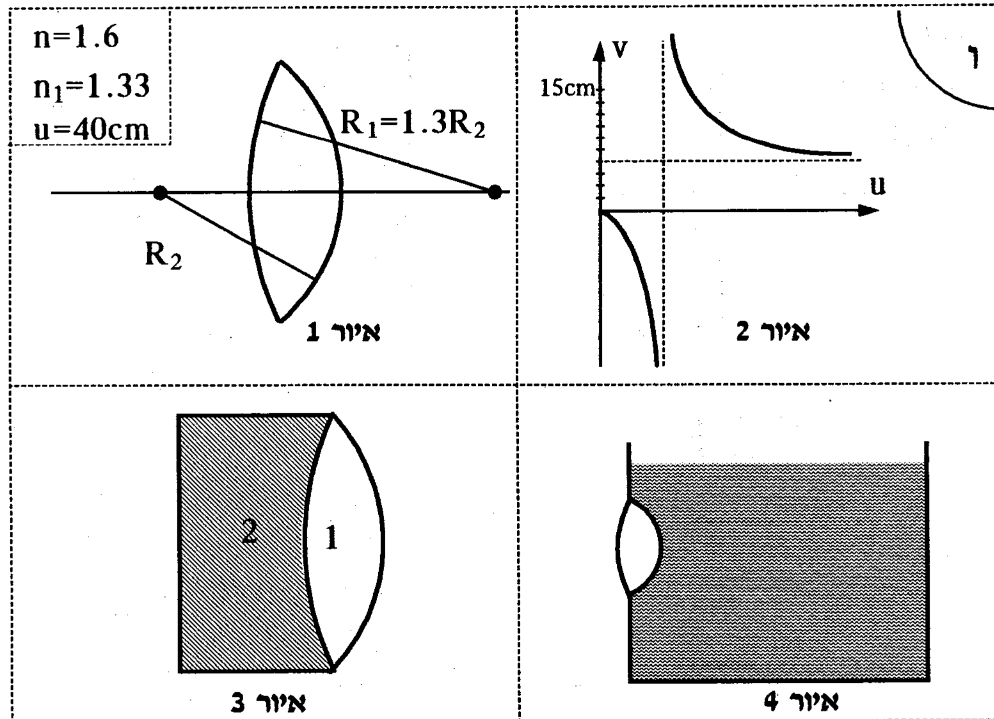

א
n=1.6
n_1=1.33
u=30cm
R_1
R_1
איור 1
v
10cm
u
איור 2
2
1
איור 3
איור 4


ב
n=1.5
n_1=1.2
u=35cm
$R_1 = 1.2R_2$
R_2
איור 1
v
15cm
u
איור 2
2
1
איור 3
איור 4


ג
n=1.7
n_1=1.3
u=30cm
R_1
איור 1
v
25cm
u
איור 2
2
1
איור 3
איור 4

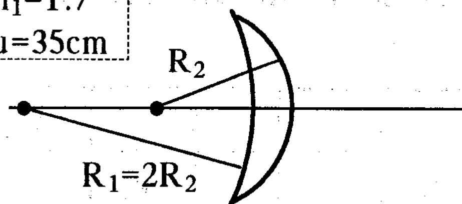

ד
n=1.5
n_1=1.4
u=50cm
R_2
איור 1
v
30cm
u
איור 2
2
1
איור 3
איור 4


ה
n=1.5
n_1=1.33
u=30cm
R_1
$R_2=2R_1$
איור 1
v
10cm
u
איור 2
2
1
איור 3
איור 4

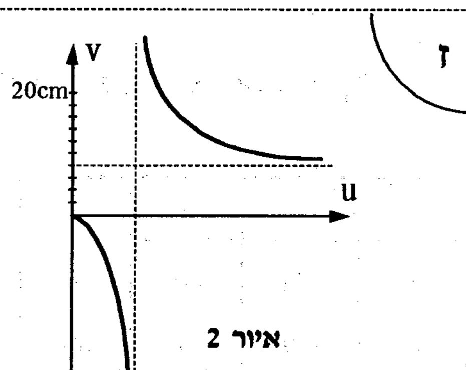

ו
n=1.6
n_1=1.33
u=40cm
$R_1=1.3R_2$
R_2
איור 1
v
15cm
u
איור 2
2
1
איור 3
איור 4

ז

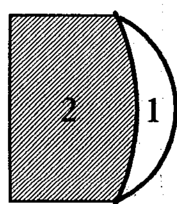
n=1.4
n_1=1.7
u=35cm



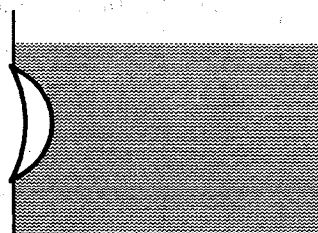
איור 1



איור 2



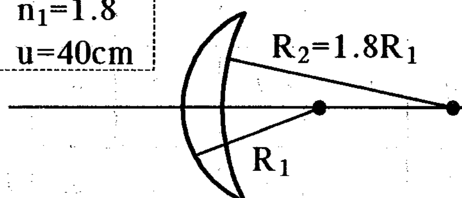
איור 3



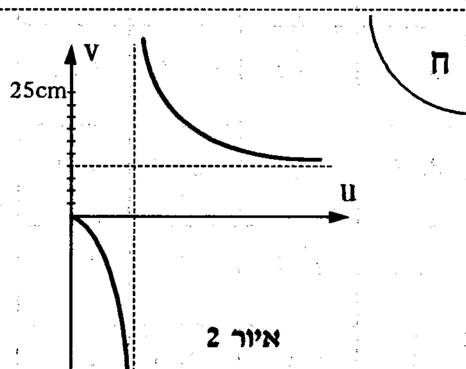
איור 4

ח

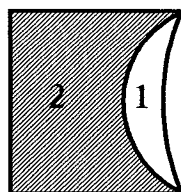
n=1.3
n_1=1.8
u=40cm



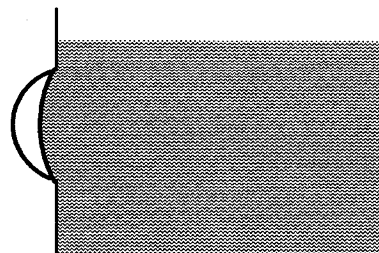
איור 1



איור 2



איור 3



איור 4

דף תשובות לסדרה ״עדשה דקה. נוסחת מרחק המוקד.״

6		5	4	3		2		1	
a_2 cm	a_1 cm	Δv cm	v cm	D D	f cm	R_2 cm	R_1 cm	f cm	
5.51	7.34	−14.8	4.62	−12.5	−8.0	4.8	4.8	4.0	א
9.38	12.5	−11.0	7.24	−7.58	−13.2	5.5	6.6	6.0	ב
10.0	13.3	−79.1	15.0	−10.0	−10.0	∞	7.0	10	ג
35.2	46.9	139.2	15.8	8.3	12.0	6.0	∞	12	ד
5.12	6.82	−27.9	4.62	−8.33	−12.0	6.0	3.0	4.0	ה
8.73	11.6	−24.8	7.06	−9.34	−10.7	6.4	8.3	6.0	ו
−12.3	−16.4	15.5	10.4	12.5	8.0	1.6	3.2	8.0	ז
4.11	5.47	16.1	13.3	−23.1	−4.3	2.4	1.3	10	ח

8.* מערכות אופטיות. מכשירים אופטיים.

מושגים ונוסחאות עיקריים.

מערכת אופטית - קבוצת התקנים אופטיים (מראות, מנסרות, עדשות), בה דמות המתקבלת בהתקן אחד משמשת כגוף עבור התקן שני.

מכשיר אופטי - מערכת אופטית המשמשת לקבלת דמויות של גופים במסכים, סרטי צילום או בעין.

מרחק המוקד של שתי עדשות צמודות:

f_1 - מרחק המוקד של העדשה הראשונה

f_2 - מרחק המוקד של העדשה השנייה

$$f = \frac{f_1 \bullet f_2}{f_1 + f_2} \qquad (1)$$

עוצמת המערכת של שתי עדשות צמודות:

D_1 - עוצמת העדשה הראשונה

D_2 - עוצמת העדשה השנייה

$$D = D_1 + D_2 \qquad (2)$$

מרחק המוקד של מערכת של שתי עדשות

(קרני אור מגיעות מכיוון העדשה הראשונה):

f_1 - מרחק המוקד של העדשה הראשונה

f_2 - מרחק המוקד של העדשה השנייה

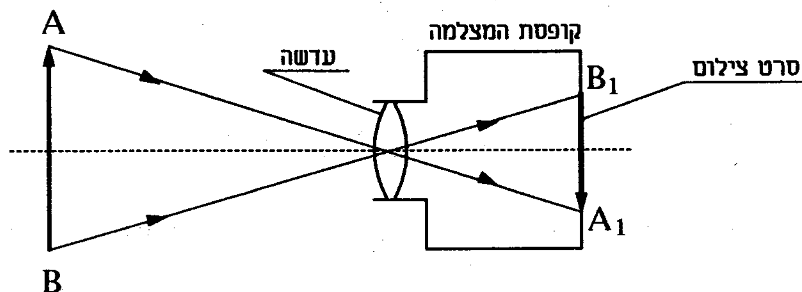
a - המרחק בין העדשות

$$f = \frac{f_1 \bullet (f_2 - a)}{f_1 + f_2 - a} \qquad (3)$$

* הסדרה מיועדת לתלמידים, המתכוננים למבחן בגרות ברמה של 5 יח"ל

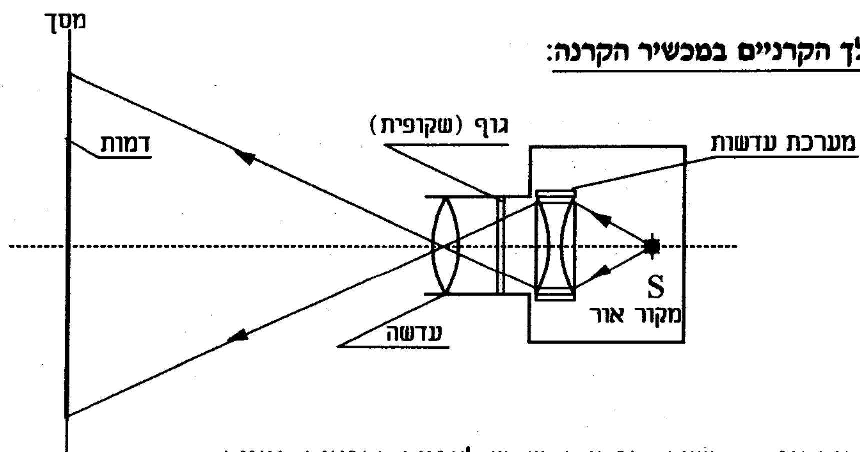
<u>מצלמה</u> - מכשיר אופטי המשמש לקבלת דמות ממשית של גוף על סרט צילום.

<u>מהלך הקרניים במצלמה:</u>



<u>מכשיר הקרנה (מקרן, מטול)</u> - מכשיר אופטי המשמש לקבלת דמות ממשית מוגדלת של גוף על המסך.

<u>מהלך הקרניים במכשיר הקרנה:</u>



<u>מיקרוסקופ</u> - מכשיר אופטי המשמש לצפייה בחפצים קטנים.

<u>הגדלה זוויתית של מקרוסקופ:</u>

f_1 - מרחק המוקד של העדשה הראשונה (אובייקטיב)

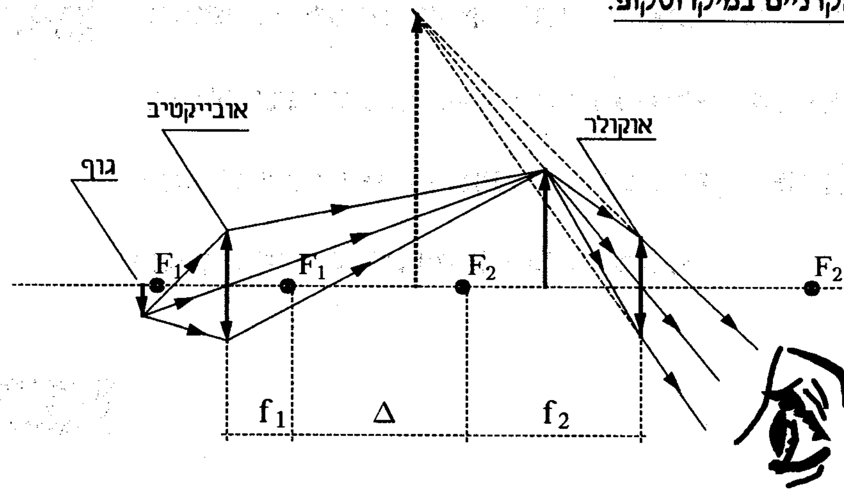
f_2 - מרחק המוקד של העדשה השנייה (אוקולר)

Δ - המרחק בין מוקדי העדשות

L_0- מרחק הראיה הקרובה (השווה ל-25 ס"מ)

$$K = \frac{L_0 \bullet \Delta}{f_1 \bullet f_2} \quad (4)$$

מהלך הקרניים במיקרוסקופ:



טלסקופ - מכשיר אופטי המשמש לצפייה בחפצים רחוקים.

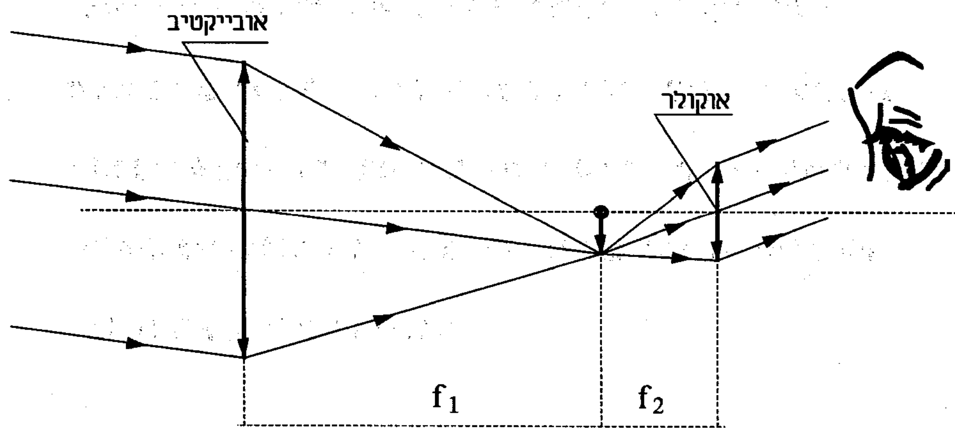
הגדלה זוויתית של טלסקופ:

f_1 - מרחק המוקד של העדשה הראשונה (אובייקטיב)

f_2 - מרחק המוקד של העדשה השנייה (אוקולר)

$$K = \frac{f_1}{f_2} \quad (5)$$

מהלך הקרניים בטלסקופ:



בעיה ברשותו של תלמיד מספר התקנים אופטיים: עדשות מרכזות ומפזרות, מראות כדוריות ומישוריות. על התלמיד לבנות מספר מערכות אופטיות, וכמו כן לבצע חישובים הנדרשים לבניות האלה.

שאלות

1. באיור 1 מובאים עדשה מרכזת, שמרחק המוקד שלה f, ומיקום של מקור אור נקודתי S.

   א) קבע מתוך האיור את מרחק המוקד של העדשה ואת מרחק המקור מהעדשה.

   ב) באיזה מרחק מהעדשה יש להציב את המראה המישורית, כדי שקרניים היוצאות מהמקור S, והעוברות דרך העדשה אחרי החזרתן מהמראה, ייצאו מהעדשה מקבילות ?

2. משתמשים בעדשה, המתוארת בשאלה הקודמת, לבניית מצלמה שבעזרתה מצלמים את המגדל, הנמצא במרחק L מהמצלמה. גובה המגדל בסרט צילום הוא H. חשב את הגובה האמיתי של המגדל.

3. במרחק L_1 מהעדשה ממקמים את המראה הכדורית המרכזת, שמרחק המוקד שלה f_1, כך, שהצירים האופטיים הראשיים של העדשה והמראה מתלכדים. קרני אור, היוצאות מהמקור S, עוברות דרך העדשה, מוחזרות מהמראה הכדורית ועוברות שנית דרך העדשה. הדמות נוצרת במקום, בו נמצא מקור האור S. חשב את המרחק L_1.

4. בונים מערכת מהעדשה שבאיור 1 ומעדשה מרכזת נוספת, שמרחק המוקד שלה f_2. באיור 2 מובא גרף התלות של מרחק המוקד של מערכת העדשות, במרחק בין העדשות. קבע מתוך הגרף את מרחק המוקד של העדשה השנייה.

5. ממקמים את העדשות, שבשאלה 4 כך, שמרחק ביניהן שווה לסכום מרחקי המוקד של שתי העדשות. חשב את ההגדלה הזוויתית של המערכת, כאשר גוף ממוקם רחוק מהמערכת.

6. ענה על השאלה 5 במקרה כאשר מרחק בין העדשות הוא a.

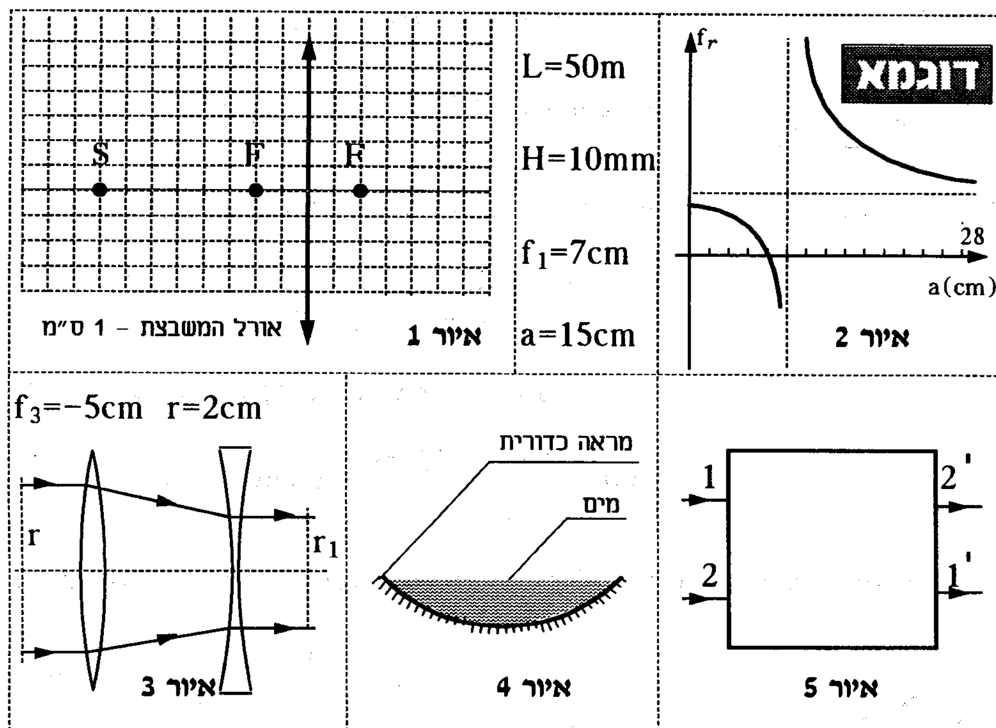
7. בונים את המערכת המורכבת מעדשה מרכזת, שמרחק המוקד שלה f_2, ומעדשה מפזרת, שמרחק המוקד שלה f_3. באיזה מרחק מהעדשה המרכזת יש למקם את העדשה

המפזרת, כדי שאלומת קרניים מקבילות, הפוגעת בעדשה המרכזת, תצא מהעדשה המפזרת גם בצורה של אלומת קרניים מקבילות ?

8. **הרדיוס של האלומת הקרניים (האלומה היא בצורת גליל) הפוגעת במערכת, שבשאלה 7 הוא r. חשב את רדיוס האלומה היוצאת מהמערכת (ראה איור 3).**

9. **לתוך מראה כדורית, שמרחק המוקד שלה f_1, נשפכו מים (ראה איור 4). חשב את מרחק המוקד של המערכת שנוצרה.**

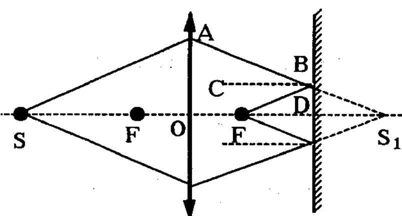
10. **ב"קופסה שחורה" נמצאת מערכת אופטית. באיור 5 מובא מהלך שתי קרניים לפני הפגיעה במערכת, שבתוך הקופסה, ומאחוריה. קבע, אילו התקנים יכולים להמצא בתוך "קופסה שחורה".**



פתרון

1. א) מאיור 1 קובעים, שמרחק המוקד הוא 2 ס"מ (שתי משבצות, ומרחק מקור האור מהעדשה הוא 8 ס"מ (שמונה משבצות).

ב) הקרניים יצאו מהעדשה מקבילות, אם הן עוברות דרך המוקד (ראה קרניים מיוחדות בסדרה 4). נניח שמראה עוברת דרך נקודה D במאונך לציר אופטי ראשי. אז הזווית CBA שווה לזווית FBC (נוסחה (1) עמוד 1).



מאידך, הזווית CBA שווה לזווית DS_1B והזווית FBC שווה לזווית DFB. מכאן:

$\angle DFB = \angle DS_1B$, המשולש FS_1B הוא שווה שוקיים ולכן $|FD| = |DS_1|$.

ומהאיור לעיל נובע שהמרחק הנדרש $|OD|$ הוא:

$$|OD| = |OF| + |FD| = |OF| + \frac{|OS_1| - |OF|}{2} = f + \frac{v-f}{2} = \frac{f+v}{2}$$

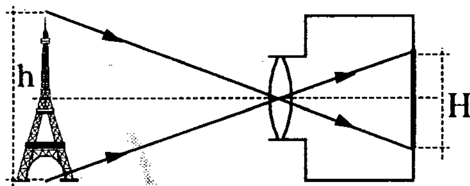
את מרחק הדמות v של המקור מהעדשה נקבע בעזרת נוסחה (1) מעמוד 75:

$$v = \frac{uf}{u-f} = \frac{8cm \bullet 2cm}{8cm-2cm} = 2.67cm$$

נציב את המרחק שנתקבל בביטוי עבור $|OD|$ ונקבל:

$$|OD| = \frac{2cm+2.67cm}{2} = 2.34cm$$

2. בהתאם לנוסחה (1) מעמוד 75, נקבע את מרחק הדמות של המגדל מהעדשה:



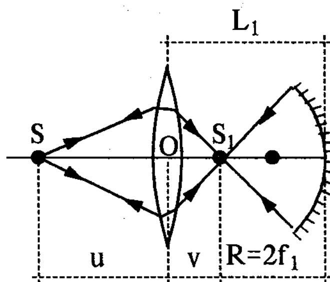
$$v = \frac{uf}{u-f} = \frac{Lf}{L-f}$$

הנוסחה 3 (עמוד 75) גוררת:

$$M = \left|\frac{H}{h}\right| = \left|\frac{v}{u}\right| \Rightarrow h = \frac{Hu}{v} = \frac{HL}{v}$$

הצבת הביטוי עבור v בביטוי האחרון מביאה לתוצאה:

$$h = \frac{H(L-f)}{f} = \frac{0.01m \bullet (50m-0.02m)}{0.02m} = 24.99m$$



3. הקרניים שיוצאות ממקור האור S מתרכזות לאחר העדשה בנקודה S_1. על מנת לקבל את מהלך קרניים שבתנאיי הבעיה, מרכז המראה צריך להתלכד עם הנקודה S_1 (ראה מהלכי קרניים מיוחדות בסדרה 2), כלומר, מרחק המראה הכדורית מהעדשה צריך להיות:

$$L_1 = |OS_1| + 2f_1 = v + 2f_1$$

את מרחק הדמות v של המקור מהעדשה נקבע בעזרת הנוסחה 1 (עמוד 75):

$$v = \frac{uf}{u-f} = \frac{8cm \bullet 2cm}{8cm-2cm} = 2.67cm$$

הצבת v בביטוי עבור L_1 מביאה לתוצאה:

$$L_1 = 2.67cm + 2 \bullet 7cm = 16.67cm$$

4. בהתאם לנוסחה (3), מרחק המוקד של מערכת שתי העדשות הוא:

$$f_r = \frac{f(f_2-a)}{f+f_2-a}$$

לפונקציה $f_r(a) = \dfrac{f(f_2-a)}{f+f_2-a}$ קיימות שתי אסימפטוטות: אנכית ואופקית. כמו כן, ישנן שתי נקודות חיתוך עם הצירים. נבהיר את המשמעות הפיזיקלית של האלמנטים האלה:

* בנקודה, בה המרחק בין העדשות שווה לסכום מרחקי המוקדים של העדשות קיימת אסימפטוטה אנכית $(f+f_2=a)$.
* אם המרחק בין העדשות שואף לאינסוף, מרחק המוקד של מערכת העדשות שואף למרחק המוקד של העדשה הראשונה.
* הקואורדינטה של נקודת החיתוך של גרף הפונקציה $f_r(a)$ עם ציר f_r שווה למרחק המוקד של מערכת שתי עדשות צמודות $(a=0)$.
* הקואורדינטה של נקודת החיתוך של גרף הפונקציה $f_r(a)$ עם ציר ה-a שווה למרחק המוקד של העדשה השנייה.

לקביעת מרחק המוקד של העדשה השנייה, ניתן להעזר באסימפטוטה האנכית או

נקודת חיתוך הגרף עם ציר ה-a. בשני המקרים מקבלים שמרחק המוקד המבוקש f_2 שווה ל-8 סנטימטר.

5. מערכת עדשות, בה המרחק בין העדשות שווה לסכום מרחקי המוקדים של העדשות, היא מערכת של טלסקופ. בהתאם לנוסחה (5), הגדלה זוויתית של הטלסקופ הנתון היא:

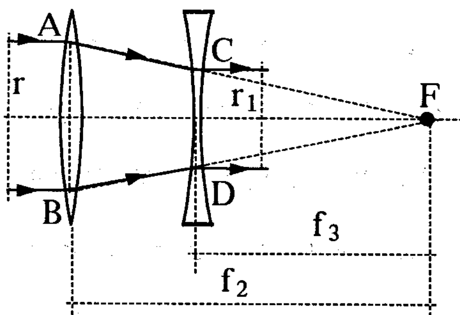
$$K = \frac{f_2}{f} = \frac{8cm}{2cm} = 4$$

6. את ההגדלה הזוויתית של המערכת, בה המרחק בין העדשות גדול מסכום מרחקי המוקדים של העדשות, ניתן לחשב לפי נוסחה (4), שהיא נוסחה לחישוב ההגדלה הזוויתית של מיקרוסקופ. מאחר והמרחק בין מוקדי שתי העדשות הוא:

$$\Delta = a - f - f_2 = 15cm - 8cm - 2cm = 5cm$$

הנוסחה (4) גוררת:

$$K_1 = \frac{L_0 \bullet \Delta}{f \bullet f_2} = \frac{25cm \bullet 5cm}{8cm \bullet 2cm} = 7.8$$

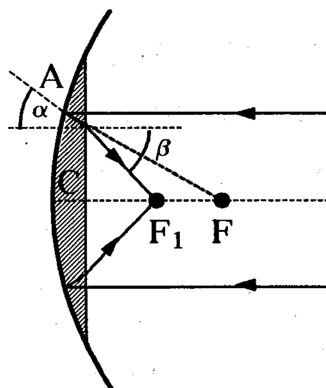


7. אלומת קרניים, היוצאת מעדשה מפזרת תהיה אלומת קרניים מקבילות, אם נקודת מפגש הקרניים המתכנסות מאחורי עדשה מרכזת מתלכדת עם מוקד העדשה המפזרת (ראה איור). מהאיור קובעים, שהמרחק הנדרש בין העדשה המרכזת לבין עדשה מפזרת הוא:

$$L_2 = f_2 - |f_3| = 8cm - |-5cm| = 3cm$$

8. נעיין במשולשים דומים ABF ו-CDF. מדימיון המשולשים נובע:

$$\frac{|AB|}{|CD|} = \frac{|OF|}{|O_1F|} \Rightarrow \frac{2r}{2r_1} = \frac{f_2}{|f_3|} \Rightarrow r_1 = \frac{r \bullet |f_3|}{f_2} = 1.25\text{cm}$$



9. נשרטט את מהלך הקרניים, המתפשטות במקביל לציר אופטי ראשי של מראה כדורית. במעבר "אוויר-מים" לא מתרחשת שבירת אור, מפני שזווית הפגיעה היא 0^0. לאחר החזרת הקרניים מהמראה ושבירתן במעבר "מים-אוויר", הקרניים נפגשות בנקודה F_1 שהיא מוקד המערכת.

למעבר "מים-אוויר" ניתן להשתמש בחוק סנל:

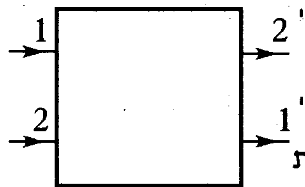
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_{\text{אוויר}}}{n_{\text{מים}}}$$

בהנחה, ששכבת המים היא שכבה דקה ושהזוויות α ו-β קטנות $(\sin\alpha \approx \tan\alpha \approx \alpha$, $\sin\beta \approx \tan\beta \approx \beta)$, חוק סנל מנביע:

$$|AC| = |CF| \bullet \tan\alpha = |CF_1| \bullet \tan\beta \Rightarrow f_1 \bullet \tan\alpha = f_4 \bullet \tan\beta \Rightarrow$$

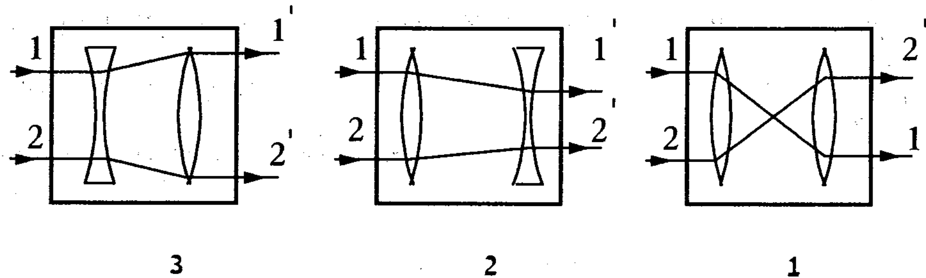
$$f_4 = \frac{f_1}{n_{\text{מים}}} = \frac{7\text{cm}}{1.33} = 5.26\text{cm}$$

10. א) האיור מראה שהקרניים נכנסות ויוצאת משני צדי המערכת. מכאן המערכת מורכבת מעדשות.

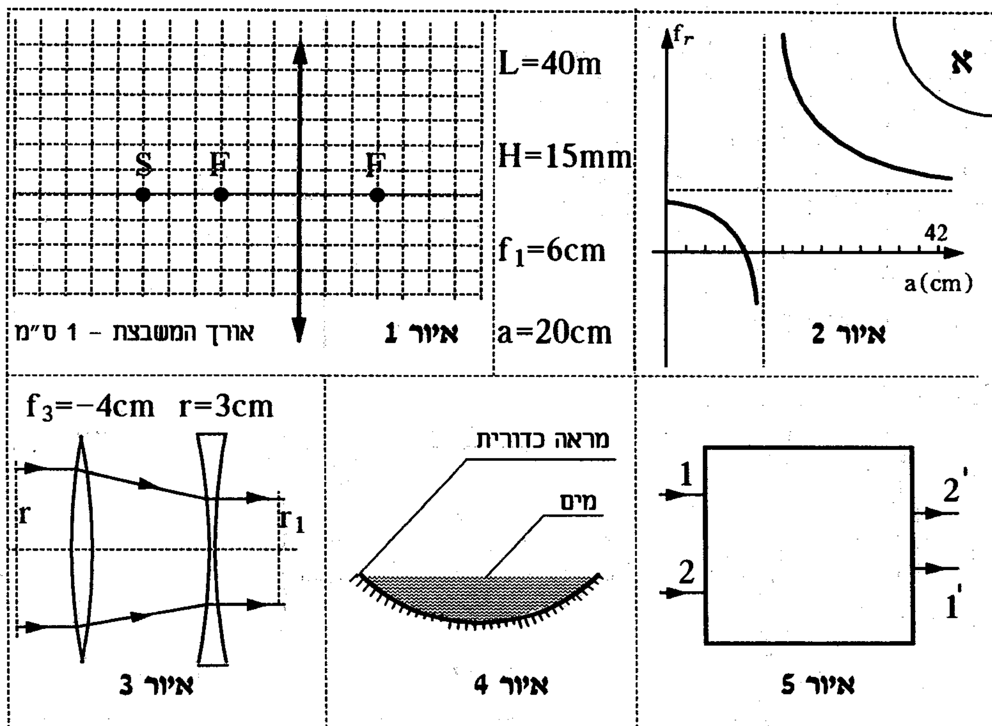


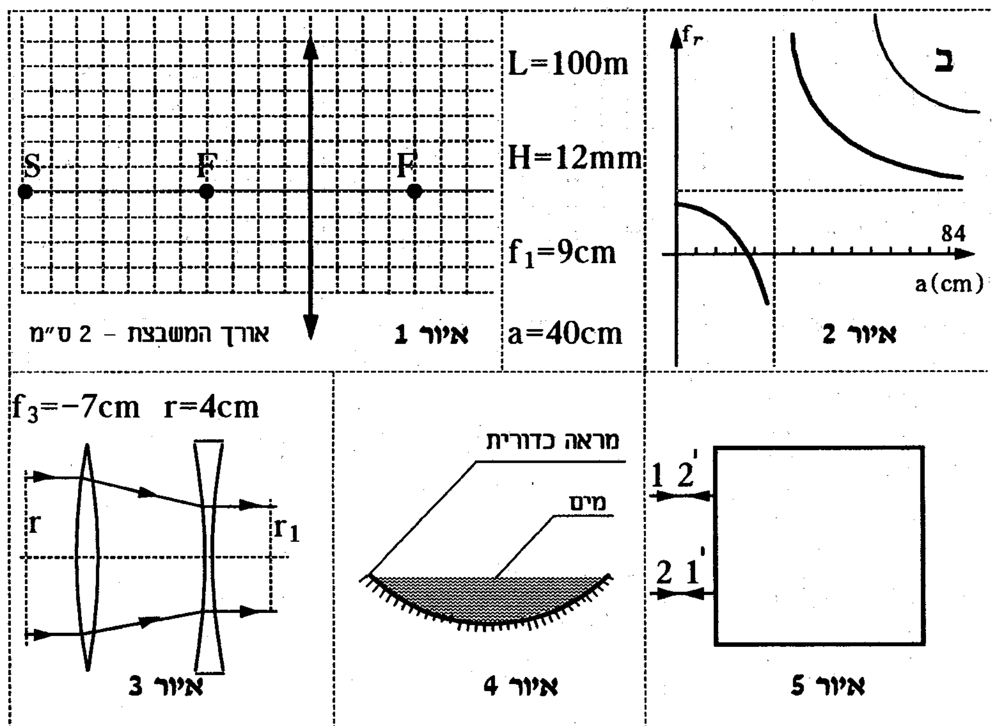
ב) המערכת הופכת את אלומת קרניים מקבילות לאלומת קרניים מקבילות. הדבר אפשרי, כאשר מוקדי שתי העדשות מתלכדים (ראה פתרון לשאלה 7).

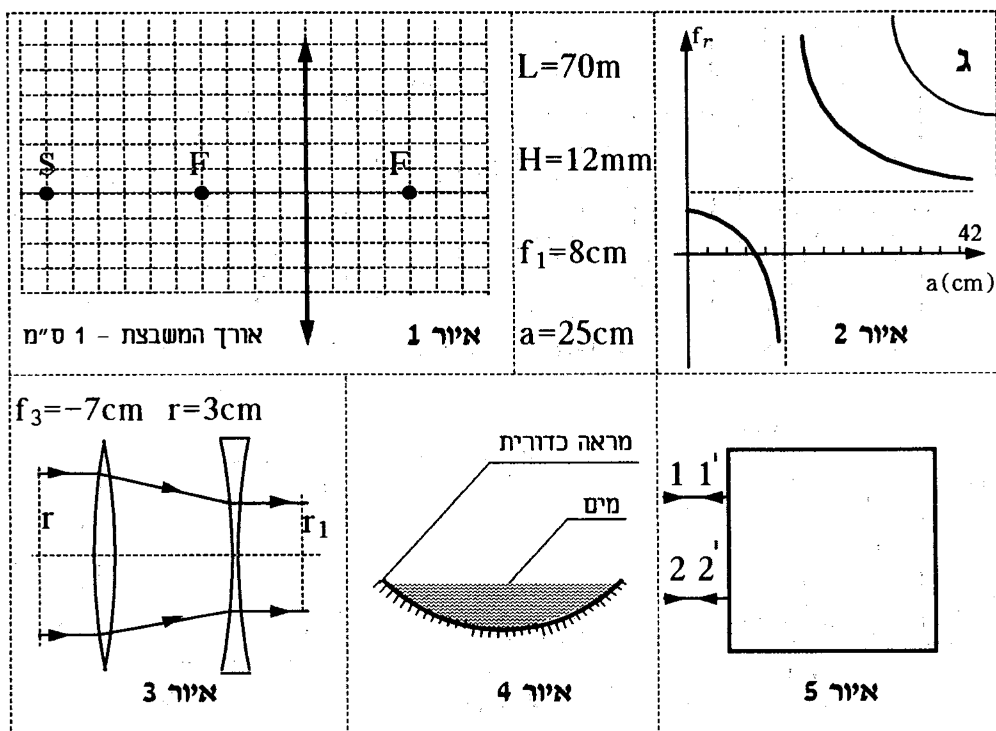
ג) המערכת יכולה לכלול שתי עדשות, בעלות מוקדים מתלכדים: "מרכזת-מרכזת", "מרכזת-מפזרת", "מפזרת-מרכזת".

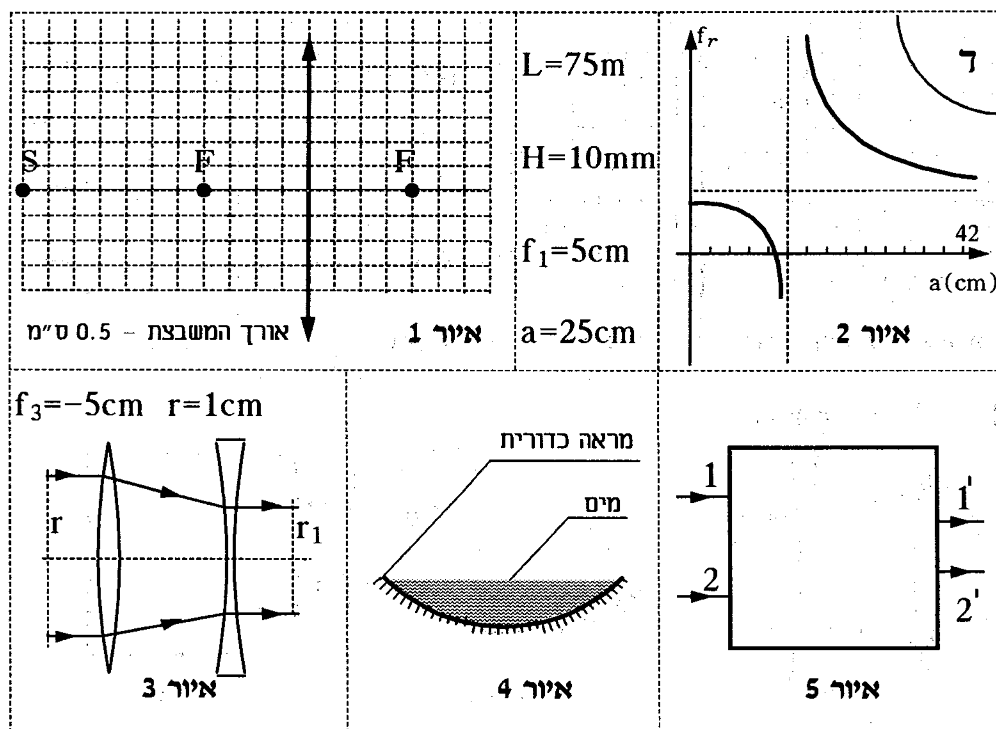


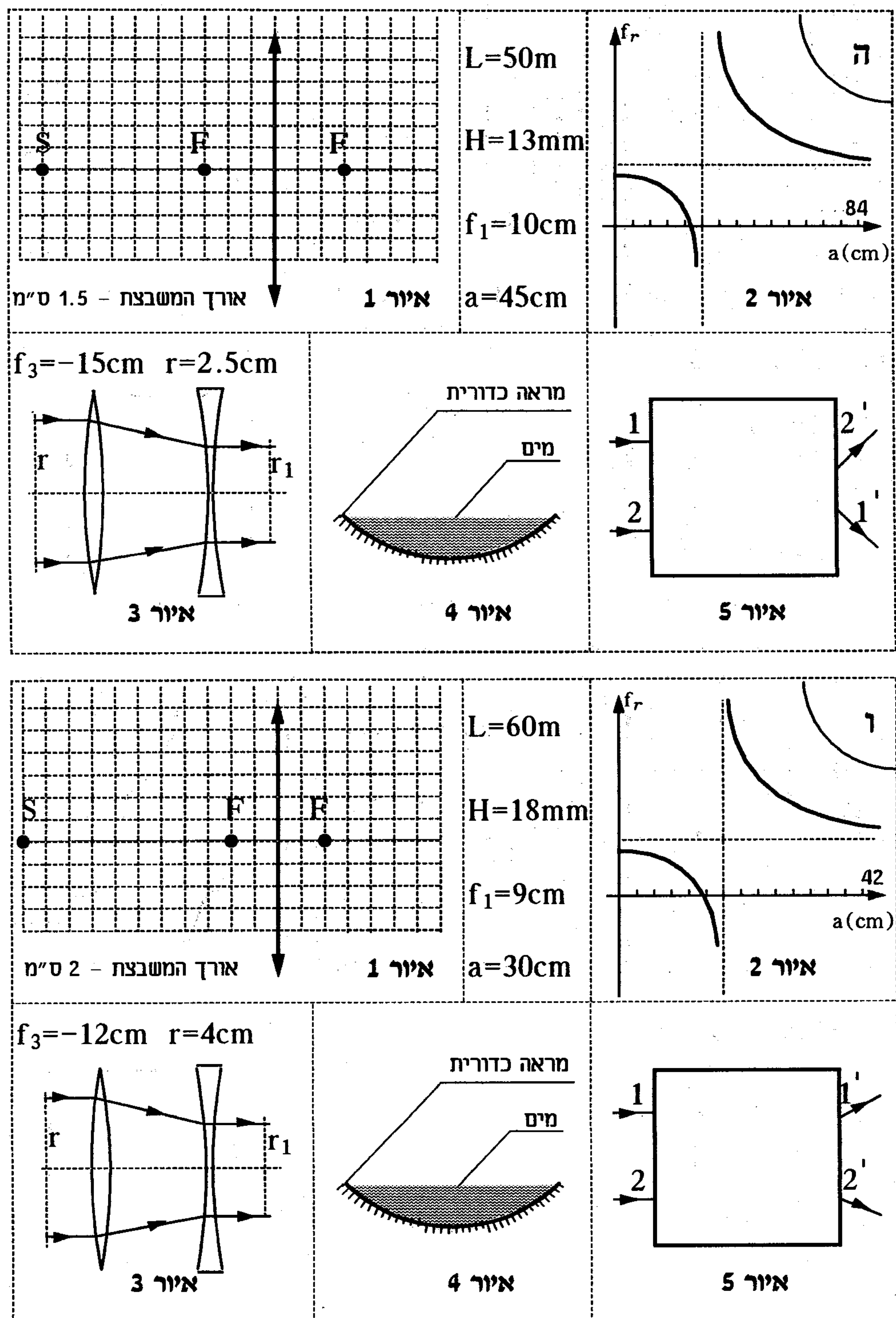
האילוץ האחרון הוא, שהמערכת צריכה להפוך את סדר הקרניים, ז"א שהקרן העליונה נהפכת לקרן התחתונה, ולהפך. האילוץ הזה קובע, שרק המערכת "1" מתאימה לתנאי הבעיה.

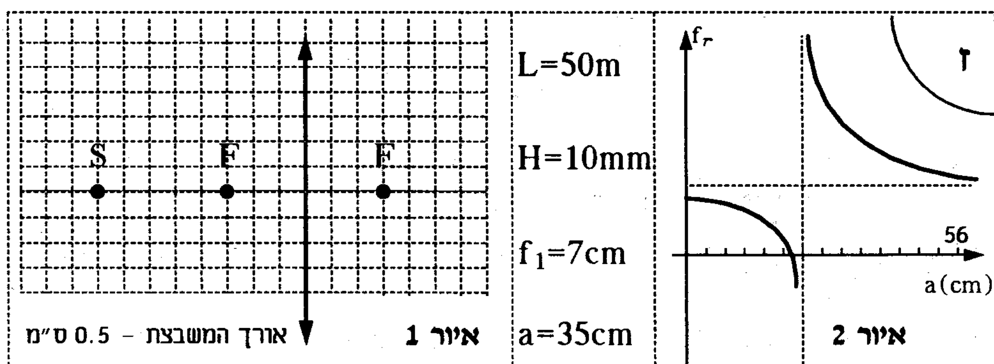

א
S
F
F
אורך המשבצת - 1 ס"מ
איור 1
L=40m
H=15mm
f1=6cm
a=20cm
fr
42
a(cm)
איור 2
f3=−4cm r=3cm
r
r1
איור 3
מראה כדורית
מים
איור 4
1
2
2'
1'
איור 5


ב
S
F
F
אורך המשבצת - 2 ס"מ
איור 1
L=100m
H=12mm
f1=9cm
a=40cm
fr
84
a(cm)
איור 2
f3=−7cm r=4cm
r
r1
איור 3
מראה כדורית
מים
איור 4
1 2'
2 1'
איור 5

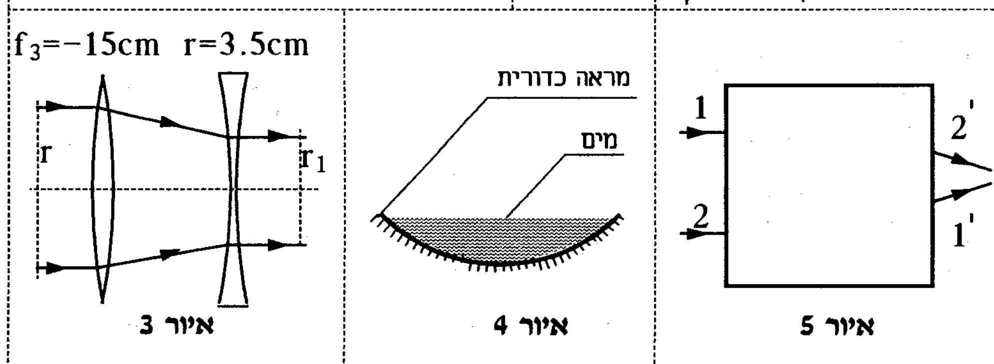

ג
L=70m
H=12mm
f_1=8cm
a=25cm
S
F
F
אורך המשבצת - 1 ס"מ
איור 1
f_r
42
a(cm)
איור 2
f_3=−7cm r=3cm
r
r_1
איור 3
מראה כדורית
מים
איור 4
1 1'
2 2'
איור 5


ד
L=75m
H=10mm
f_1=5cm
a=25cm
S
F
F
אורך המשבצת - 0.5 ס"מ
איור 1
f_r
42
a(cm)
איור 2
f_3=−5cm r=1cm
r
r_1
איור 3
מראה כדורית
מים
איור 4
1
2
1'
2'
איור 5

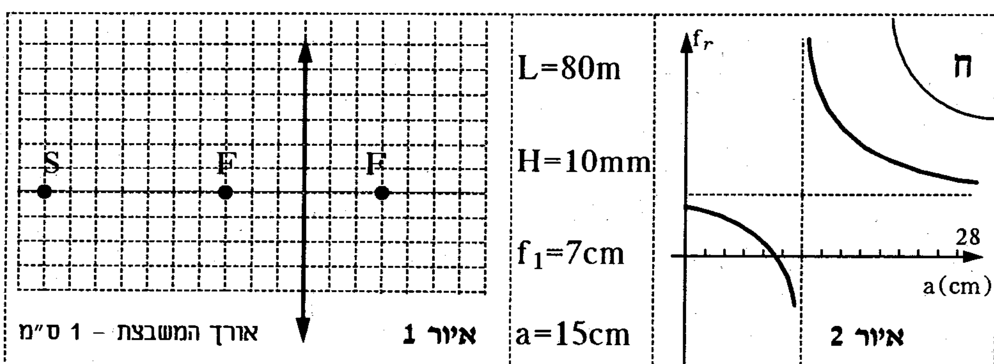

ה
S
F
F
אורך המשבצת - 1.5 ס"מ
איור 1
L=50m
H=13mm
f_1=10cm
a=45cm
f_r
84
a(cm)
איור 2
f_3=−15cm r=2.5cm
r
r_1
איור 3
מראה כדורית
מים
איור 4
1
2
2'
1'
איור 5
ו
S
F
F
אורך המשבצת - 2 ס"מ
איור 1
L=60m
H=18mm
f_1=9cm
a=30cm
f_r
42
a(cm)
איור 2
f_3=−12cm r=4cm
r
r_1
איור 3
מראה כדורית
מים
איור 4
1
2
1'
2'
איור 5



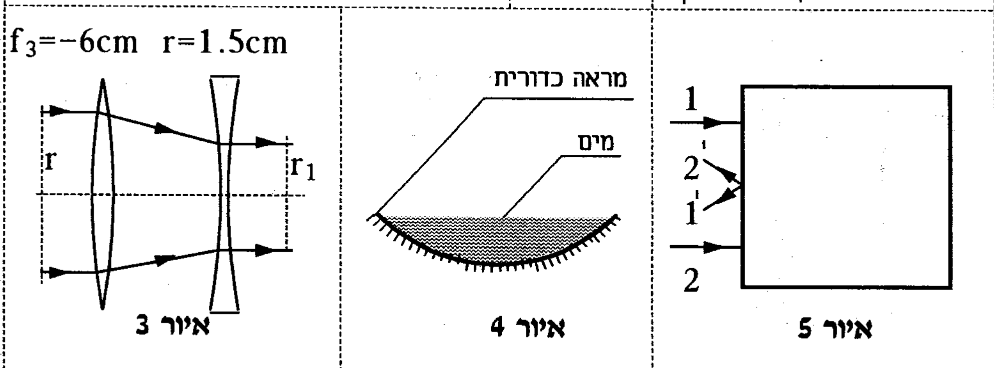
ז
S
F
F
L=50m
H=10mm
f_1=7cm
a=35cm
f_r
56
a(cm)
אורך המשבצת - 0.5 ס"מ
איור 1
איור 2



f_3=−15cm r=3.5cm
r
r_1
מראה כדורית
מים
1
2
2'
1'
איור 3
איור 4
איור 5



ח
S
F
F
L=80m
H=10mm
f_1=7cm
a=15cm
f_r
28
a(cm)
אורך המשבצת - 1 ס"מ
איור 1
איור 2

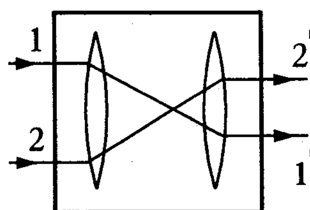


f_3=−6cm r=1.5cm
r
r_1
מראה כדורית
מים
1
2'
1'
2
איור 3
איור 4
איור 5

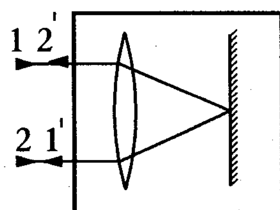
דף תשובות לסדרה " מערכות אופטיות. מכשירים אופטיים".

f_4	r_1	L_2	K_1	K	f_2	L_1	h	|OD|	u	f	
cm	cm	cm			cm	cm	m	cm	cm	cm	
4.5	1.0	8.0	3.5	4.0	12.0	18.0	20.0	4.50	6.0	3.0	א
6.8	1.3	15.0	1.4	2.75	22.0	30.6	15.0	10.3	22.0	8.0	ב
6.0	1.9	4.0	5.7	2.75	11.0	22.7	21.0	5.33	10.0	4.0	ג
3.8	0.4	8.0	9.6	6.5	13.0	13.1	37.5	2.57	5.5	2.0	ד
7.5	1.5	10.5	3.3	5.7	25.5	26.4	14.4	5.46	15.0	4.5	ה
6.8	3.4	2.0	5.4	3.5	14.0	22.9	27.0	4.44	22.0	4.0	ו
5.3	2.3	7.5	8.2	15.0	22.5	16.4	33.3	1.95	4.0	1.5	ז
5.3	1.0	3.0	2.8	3.0	9.0	18.3	26.7	3.64	10.0	3.0	ח

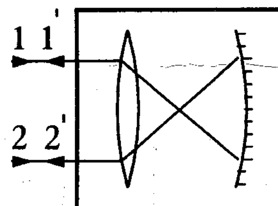
דוגמאות התשובות לשאלה מס׳ 10.



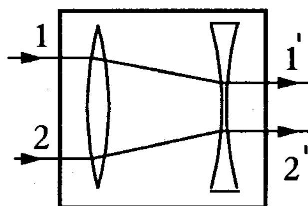
א



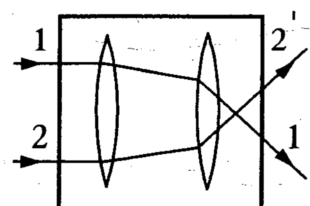
ב



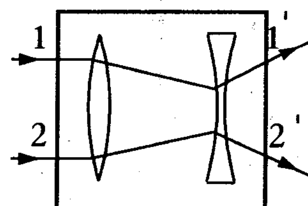
ג



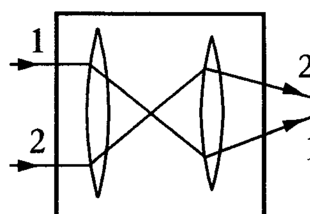
ד



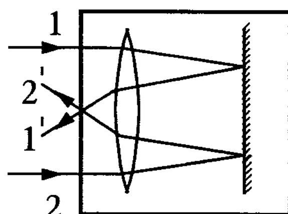
ה



ו



ז



ח

9. עין. ליקויי ראיה. משקפיים.

מושגים ונוסחאות עיקריים.

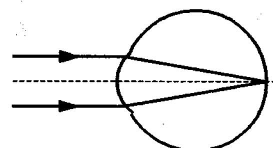
מרחק הראיה הרחוקה ביותר - המרחק הגדול ביותר, ממנו עין רואה בלי מאמץ. לעין תקינה, המרחק הראיה הרחוקה ביותר הוא אינסוף.

מרחק הראיה הקרובה ביותר - המרחק הקטן ביותר, ממנו עין רואה חפצים בצורה לא מטושטשת. לעין תקינה, מרחק הראיה הקרובה ביותר הוא 15-20 סנטימטר.

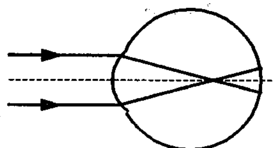
מרחק הראיה הקרובה - המרחק ממנו עין רואה חפצים ללא מאמץ גדול. לעין תקינה, מרחק הראיה הקרובה הוא 25 סנטימטר.

אקומודאציה (הסתגלות העין) - תכונת העין להסתגל לראות חפצים במרחקים שונים. ההסתגלות מתבצעת באמצעות שינוי מרחק המוקד של עדשת העין.

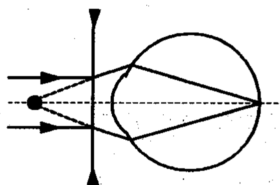
קוצר ראיה - ליקוי ראיה בו מרחק הראיה הרחוקה ביותר קטן מזה של עין תקינה. בעל קוצר ראיה אינו רואה היטב חפצים הנמצאים רחוק.



עין תקינה: מהלך קרניים מחפצים הממוקמים רחוק



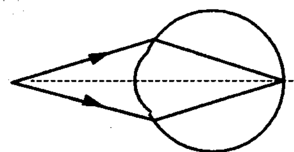
מעלך קרניים במקרה של קוצר ראיה



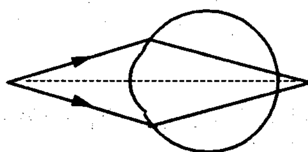
תיקון קוצר הראיה בעזרת עדשה מפזרת

רוחק ראיה - ליקוי ראיה בו מרחק הראיה הקרובה ביותר גדול מזה של עין תקינה.

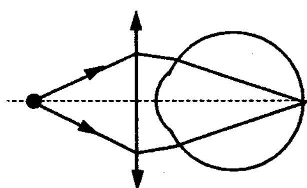
בעל רוחק ראיה אינו רואה היטב חפצים הנמצאים קרוב לעין.



עין תקינה: מהלך קרניים מחפצים הממוקמים קרוב



מהלך קרניים במקרה של רוחק ראיה



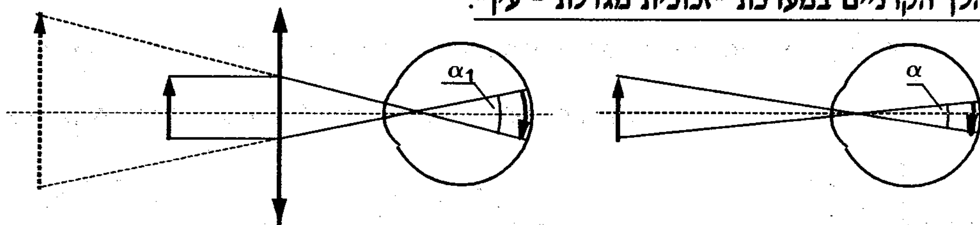
תיקון רוחק הראיה בעזרת עדשה מרכזת

זווית הראיה - זווית בה עין רואה את הגוף.

מרחק הראיה הטובה ביותר (מונח נוסף למרחק הראיה הקרובה) - מרחק הגוף מהעין עבורו זווית הראיה היא גדולה ביותר, ומאמץ העין אינו גדול (העין אינה מתעייפת).

זכוכית מגדלת - מכשיר אופטי המשמש להגדלת זווית הראיה.

מהלך הקרניים במערכת "זכוכית מגדלת - עין":



הגדלה זוויתית של זכוכית מגדלת:

α - זווית הראיה ללא זכוכית מגדלת

α_1 - זווית הראיה עם זכוכית מגדלת

L_0 - מרחק הראיה הקרובה

f - מרחק המוקד של זכוכית מגדלת

$$K = \frac{\alpha_1}{\alpha} \approx \frac{L_0}{f} \qquad (1)$$

בעיה שלושה אנשים משוחחים על הראיה שלהם. בשיחה התברר, שלשנים מהם יש ליקויי ראיה. כל אחד מהמשוחחים קורא עיתון בלי משקפיים כאשר העיתון נמצא במרחק u מהעין (u שונה לכל אחד מהמשוחחים).

שאלות

1. באיור 1 מובאים מרחקים בהם האנשים קוראים עיתון בלי משקפיים (ז"א מרחק הראיה הקרובה), וכן שרטוטים המתארים את מהלכי הקרניים בעין של כל אחד מהם. התאם את המרחקים לשרטוטים וזהה את סוג הליקוי.
2. קבע את עוצמת העדשות, שצריך להתאים לאדם הסובל מקוצר ראיה.
3. אדם בעל קוצר ראיה מסתכל בלי משקפיים בעיתון דרך לוחית שעשוייה מחומר בעל מקדם השבירה n (ראה איור 2). קבע את העובי המקסימלי של הלוחית עבורו אדם בעל קוצר ראיה יכול לקרוא עיתון.

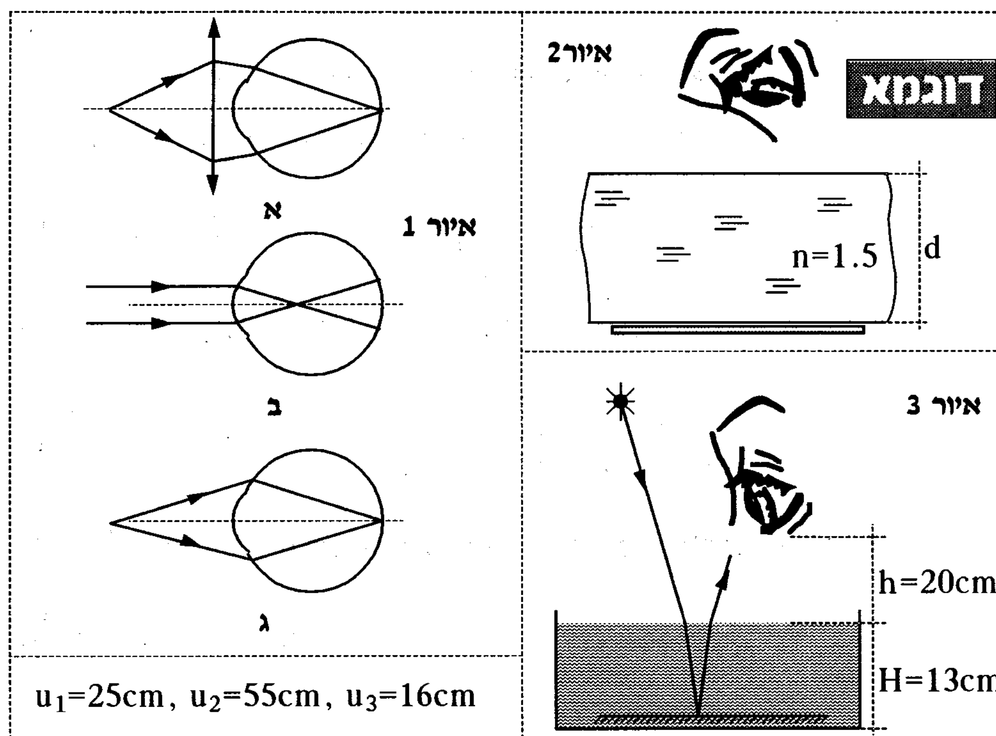
4. קבע את עוצמת העדשות, שצריך להתאים לאדם הסובל מרוחק ראיה.

---

5. אדם בעל ראיה תקינה מרכיב משקפיים של אדם בעל רוחק ראיה. באיזה מרחק צריך למקם גוף, כדי שהעין תוכל לראותו ללא מאמץ ?
6. אדם בעל ראיה תקינה מרכיב משקפיים של אדם בעל קוצר ראיה. מהו מרחק הראיה הקרובה במקרה זה ?
7. אדם בעל ראיה תקינה מסתכל באקווריאום, בו על הקרקעית נמצאת מראה מישורית. לאיזה מרחק מסתגלת העין שלו (ראה איור 3) ?
8. שלושה אנשים, המוזכרים לעיל, מסתכלים אל אותו עצם דרך זכוכית מגדלת עליה חרוט "$10\times$".

א) חשב את מרחק המוקד של הזכוכית מגדלת.

ב) באיזו הגדלה יראה את העצם כל אחד משלושת האנשים ?



פתרון

1. באיור 1א מתואר מהלך קרניים במערכת "עין-עדשה מרכזת" של בעל רוחק ראיה עבורו מרחק הראיה הקרובה גדול מזה של עין תקינה. מכאן נובע שלאיור 1א מתאים מרחק הראיה הקרובה u_2.

באיור 1ב מתואר מהלך קרניים בעין של בעל קוצר ראיה עבורו מרחק הראיה הקרובה קטן מזה של עין תקינה. מכאן נובע שלאיור 1ב מתאים מרחק הראיה הקרובה u_3.

באיור 1ג מתואר מהלך קרניים בעין תקינה, לכן לאיור זה מתאים מרחק הראיה הקרובה u_1.

2. נרשום את נוסחת העדשה (נוסחה (1) מסדרה 6, עמוד 75) עבור "עין בלי המשקפיים" ועבור "עין בעלת המשקפיים":

"עין בלי משקפיים":
$$\frac{1}{u_3} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

כאן: v - עומק העין, f - מרחק המוקד של עדשת העין.

"עין עם משקפיים":
$$\frac{1}{L_0} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f_1}$$

כאן: L_0 - מרחק הראיה הקרובה לעין תקינה, f_1 - מרחק המוקד של עדשות.

שני השיוויונות האחרונים גוררים:

$$D_1 = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{L_0} - \frac{1}{u_3} = \frac{u_3-L_0}{L_0 \bullet u_3} = \frac{0.16m-0.25m}{0.16m \bullet 0.25m} = -2.25D$$

3. דמות של עיתון, הממוקם מתחת ללוחית שקופה, נמצאת במרחק $\frac{d}{n}$ מהדופן העליונה של הלוחית (ראה פיתרון לשאלה 8 מסדרה 3). מרחק זה צריך להיות שווה למרחק הראיה הקרובה של אדם בעל קוצר ראיה (בלי משקפיים), דהיינו 16 ס"מ. מכאן:

$$u_3 = \frac{d}{n} \Longrightarrow d = u_3 \bullet n = 16cm \bullet 1.5 = 24cm$$

4. דמות מדומה וישרה, הנוצרת בעדשות, נמצאת במרחק הראיה הקרובה של אדם בעל רוחק ראיה, והגוף עצמו נמצא במרחק L_0=25cm. נוסחת העדשה

(נוסחה (1) מסדרה 6, עמוד 75) תירשם במקרה זה כך:

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{L_0} - \frac{1}{u_2}$$

כאן f_2 - מרחק המוקד של עדשות.

מהשיוויון האחרון נובע, שעוצמת העדשות של אדם בעל רוחק ראיה היא:

$$D_2 = \frac{1}{f_2} = \frac{u_2 - L_0}{u_2 \bullet L_0} = \frac{0.55m - 0.25m}{0.55m \bullet 0.25m} = 2.18D$$

5. נרשום את נוסחת העדשה עבור עין בלי משקפיים ועבור עין עם משקפיים בשני המקרים: **א)** הגוף נמצא באינסוף. **ב)** הגוף נמצא במרחק הראיה הקרובה.

א)

עין בלי משקפיים: $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$

עין עם משקפיים: $\frac{1}{x} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f_2}$

כאן v - עומק העין, f - מרחק המוקד של עדשת העין, u - מרחק הגוף מהעין $(u=\infty)$, x - מרחק הגוף מעדשת המשקפיים, f_2 - מרחק המוקד של עדשת המשקפיים.

השיוויונות האחרונים מנביעים: $x = f_2$. מאחר ו- $D_2 = 2.18D$ (ראה שאלה 4)

נקבל: $x = f_2 = \frac{1}{D_2} = 0.46m$

ב)

עין בלי משקפיים: $\frac{1}{L_0} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$

עין עם משקפיים: $\frac{1}{y} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f_2}$

כאן y - מרחק הגוף מעדשת המשקפיים.

שני השיוויונות האחרונים גוררים:

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{L_0} + \frac{1}{f_2} \implies y = \frac{L_0 \bullet f_2}{L_0 + f_2} = \frac{0.25m \bullet 0.46m}{0.25m + 0.46m} = 0.16m$$

אדם בעל ראיה תקינה המרכיב משקפיים של אדם הסובל מרוחק ראיה, יראה ללא מאמץ גופים הממוקמים בין 0.16 מטר לבין 0.46 מטר.

6. נרשום את נוסחת העדשה עבור עין בלי משקפיים ועבור עין עם משקפיים:

עין בלי משקפיים: $\frac{1}{L_0} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$

עין עם משקפיים: $\frac{1}{y} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f_1}$

שני השיוויונות האחרונים לעיל מנביעים:

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{L_0} + \frac{1}{f_1} \implies y = \frac{L_0 \bullet f_1}{L_0 + f_1} = \frac{0.25m \bullet (-0.44m)}{0.25m - 0.44m} = 0.58m$$

7. עין של אדם, המסתכל באקווריאום, מסתגלת

למרחק $|SS_1|$, שהוא: $|SS_1| = |SA| + |AS_1|$.

מהמשולש BEC נובע: $|BC| = 2H \bullet \tan\beta$.

מהמשולש SAB מקבלים: $|AB| = h \bullet \tan\alpha$.

מהמשולש CAS_1, אורך הקטע $|AS_1|$ הוא:

$$|AS_1| = |AC| \bullet \cot\alpha = \frac{|AC|}{\tan\alpha}$$

מאחר ו- $|AC| = |AB| + |BC|$, נקבל:

$$|AS_1| = \frac{|AB| + |BC|}{\tan\alpha} = \frac{h \bullet \tan\alpha + 2H \bullet \tan\beta}{\tan\alpha}.$$

בהתאם לחוק סנל (נוסחה (3) מסדרה 3, עמוד 32) ובהנחה שהזוויות

קטנות, נרשום בקירוב: $\frac{\tan\alpha}{\tan\beta} \approx n_{\text{מים}}$. מכאן המרחק המבוקש $|SS_1|$ הוא:

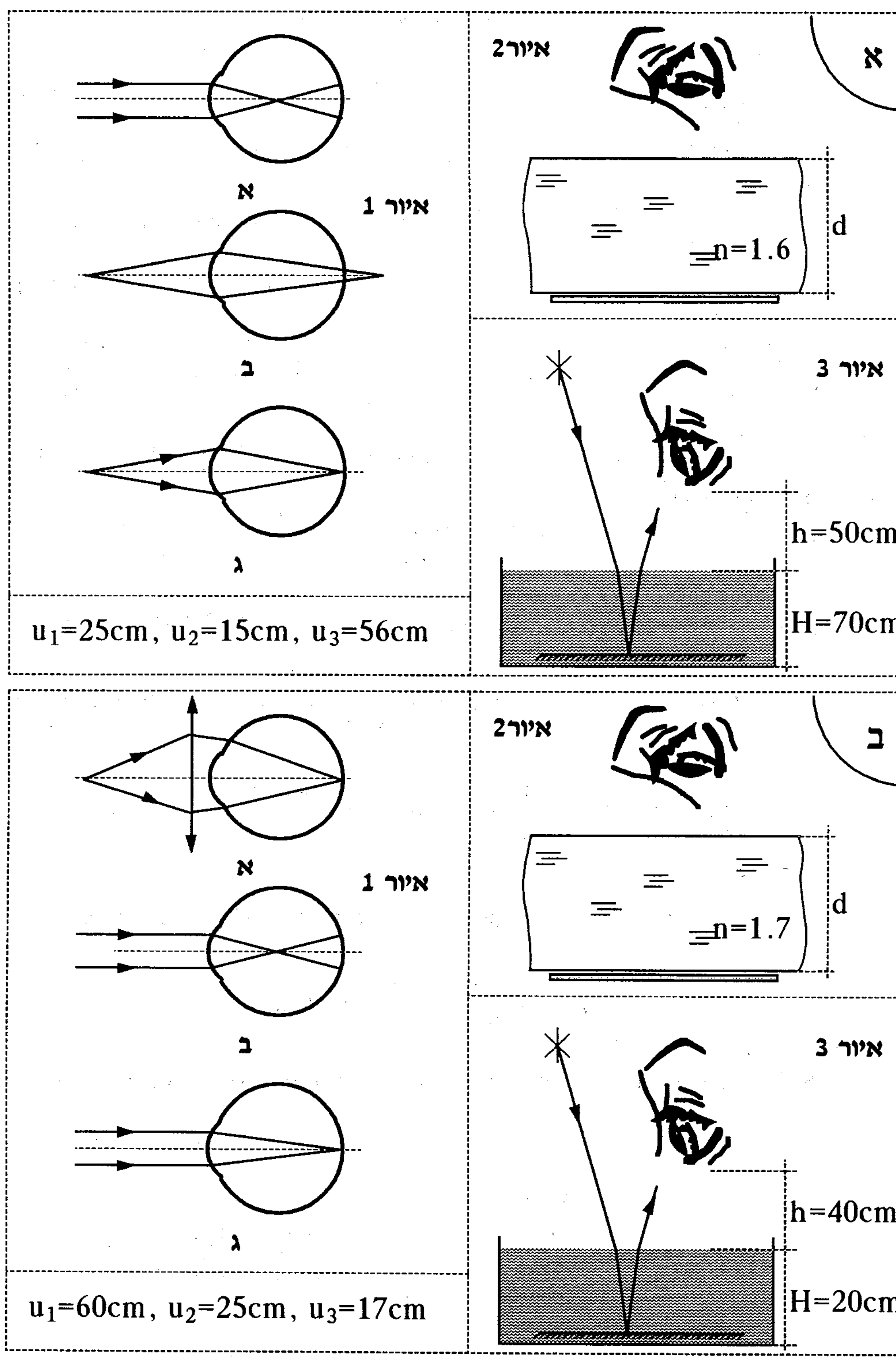
$$|SS_1| = 2h + \frac{2H}{n_{\text{מים}}} = 2 \bullet 20\text{cm} + \frac{2 \bullet 13\text{cm}}{1.33} = 59.55\text{cm}$$

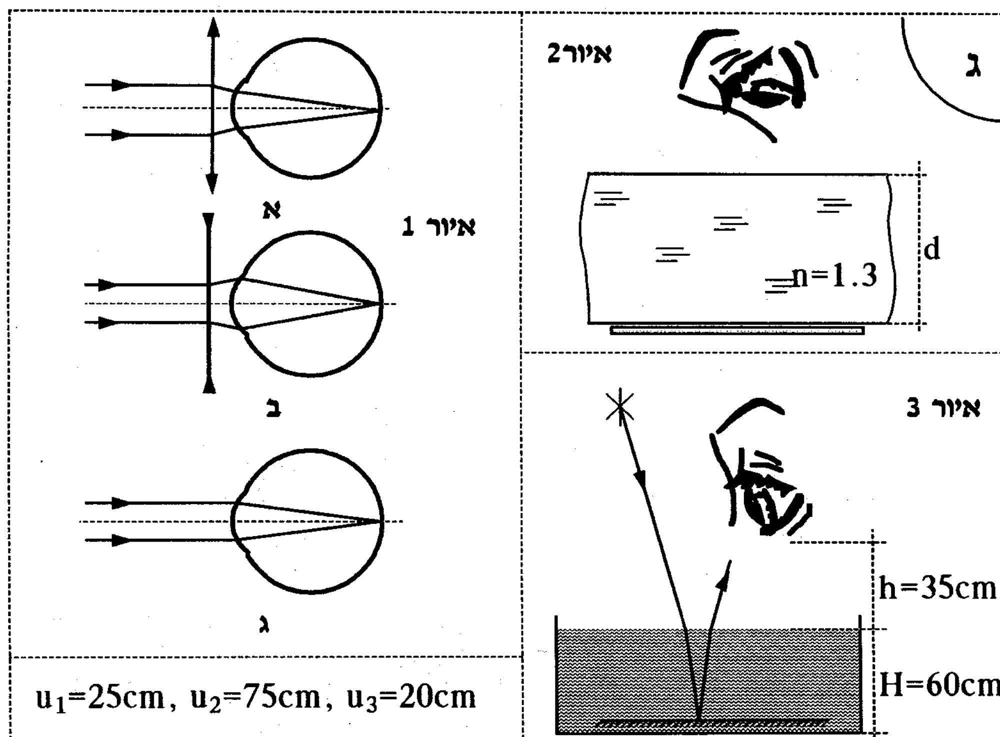
8. א) על פי הנוסחה (1), מרחק המוקד של הזכוכית המגדלת הוא:

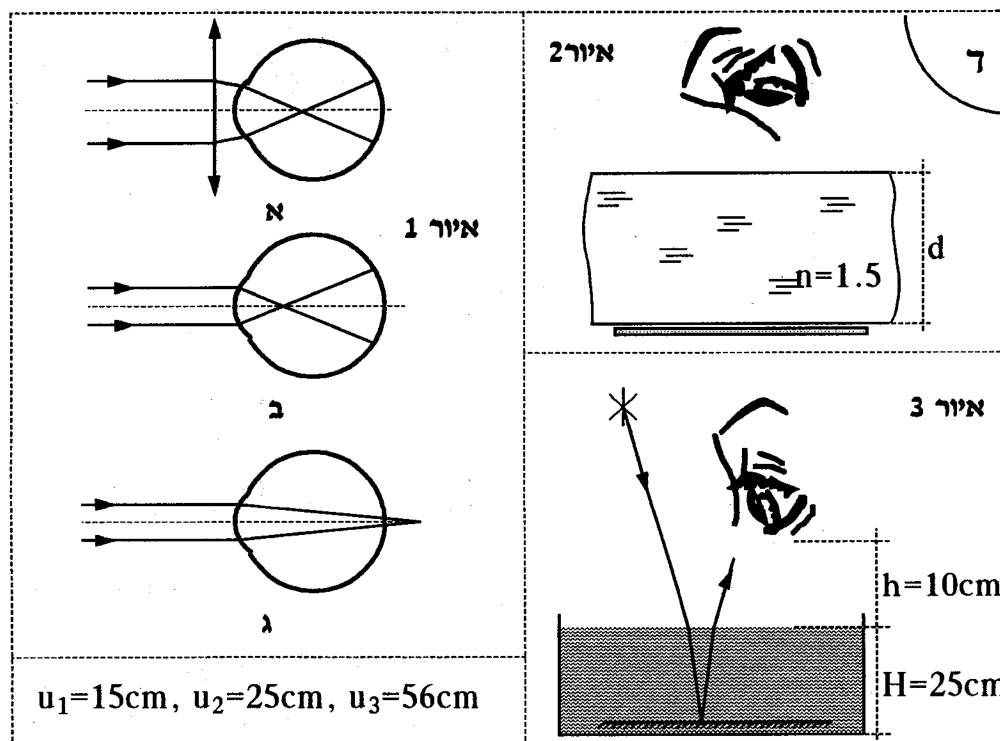
$$f_{\text{ז"מ}} = \frac{L_0}{K} = \frac{25\text{cm}}{10} = 2.5\text{cm}$$

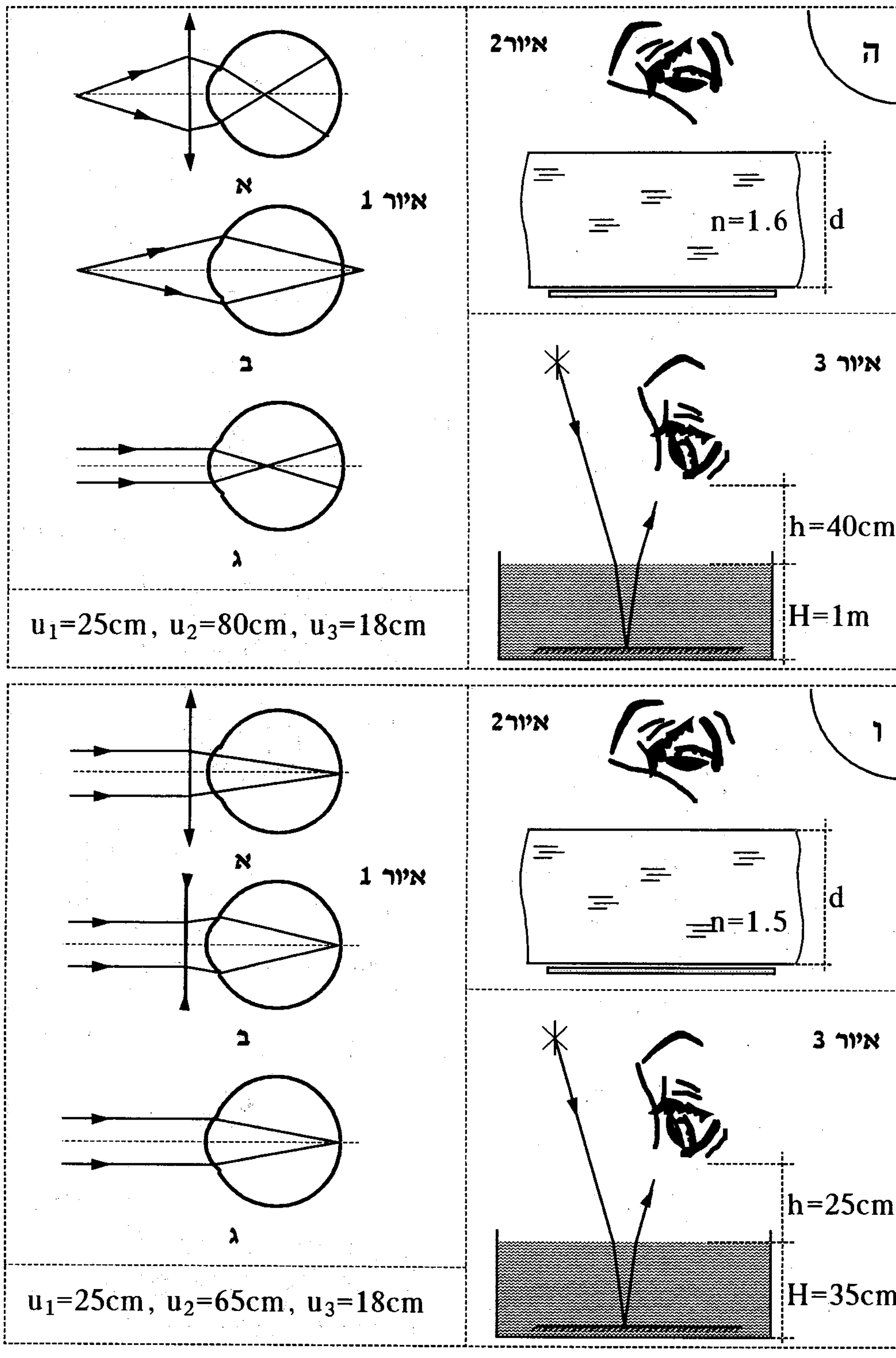
ב) בעזרת אותה נוסחה נוכל לחשב את ההגדלה של הזכוכית המגדלת לאנשים בעלי ליקויי ראיה:

$$K_1 = \frac{u_2}{f_{\text{ז"מ}}} = \frac{55\text{cm}}{2.5\text{cm}} = 22, \quad K_2 = \frac{u_3}{f_{\text{ז"מ}}} = \frac{16\text{cm}}{2.5\text{cm}} = 6.4$$


א
איור 1
א
ב
ג
u_1=25cm, u_2=15cm, u_3=56cm
איור2
n=1.6
d
איור 3
h=50cm
H=70cm
ב
איור 1
א
ב
ג
u_1=60cm, u_2=25cm, u_3=17cm
איור2
n=1.7
d
איור 3
h=40cm
H=20cm


ג
איור2
איור 1
א
ב
ג
d
n=1.3
איור 3
h=35cm
H=60cm
u_1=25cm, u_2=75cm, u_3=20cm


ד
איור2
איור 1
א
ב
ג
d
n=1.5
איור 3
h=10cm
H=25cm
u_1=15cm, u_2=25cm, u_3=56cm


ה
איור2
n=1.6
d
איור 1
א
ב
ג
u1=25cm, u2=80cm, u3=18cm
איור 3
h=40cm
H=1m
ו
איור2
n=1.5
d
איור 1
א
ב
ג
u1=25cm, u2=65cm, u3=18cm
איור 3
h=25cm
H=35cm

ז

איור 1

מים

א

ב

ג

u_1=25cm, u_2=80cm, u_3=17cm

איור 2

n=1.4

d

איור 3

h=40cm

H=30cm

ח

איור 1

א

ב

מים

ג

u_1=15cm, u_2=25cm, u_3=66cm

איור 2

n=1.6

d

איור 3

h=0.5m

H=1.2m

דף תשובות לסדרה "עין. ליקויי ראיה. משקפיים."

	1			2	3	4	5		6	7	8		
	א	ב	ג	D_1	d	D_2	x	y	y	$\lvert SS_1 \rvert$	f	K_1	K_2
				$\frac{1}{m}$	cm	$\frac{1}{m}$	cm	cm	cm	m	cm		
א	2	3	1	−2.7	24.0	2.2	45.2	16.1	75.1	2.1	2.5	22.4	6.0
ב	1	3	2	−1.9	28.9	2.3	42.9	15.8	47.2	1.1	2.5	24.0	6.8
ג	2	3	1	−1.0	26.0	2.7	37.5	15.0	33.3	1.6	2.5	30.0	8.0
ד	2	1	3	−2.7	22.5	2.2	45.2	16.1	75.1	0.6	2.5	22.4	6.0
ה	1	2	3	−1.6	28.8	2.8	36.4	14.8	41.0	2.3	2.5	32.0	7.2
ו	2	3	1	−1.6	27.0	2.5	40.7	15.5	41.0	1.0	2.5	26.0	7.2
ז	3	1	2	−1.9	23.8	2.8	36.4	14.8	47.2	1.3	2.5	32.0	6.8
ח	2	3	1	−2.7	24.0	2.5	40.2	15.6	75.1	2.8	2.5	26.4	6.0

*10. פוטומטריה.

מושגים ונוסחאות עיקריים.

<u>**פוטומטריה**</u> - פרק באופטיקה, העוסק במאפיינים אנרגטיים של האור.

<u>**שטף הקרינה** (נמדד בלומן [lumen])</u> - הספק של קרינת האור המשפיע על העין.

<u>**עוצמת האור** (נמדד בקנדל [candle]) של מקור האור נקודתי</u> - גודל פיזיקלי,

שערכו המספרי שווה לשטף הקרינה, הנוצר על ידי המקור, ביחידת הזווית המרחבית:

Φ - שטף הקרינה

Ω - זווית מרחבית

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \qquad (1)$$

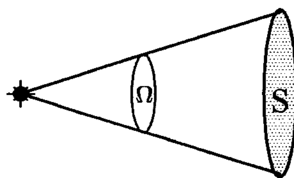
<u>**הארת המשטח** (נמדד בלוקס [lux])</u> - גודל פיזיקלי, שערכו המספרי שווה ליחס

של שטף הקרינה ליחידת השטח:

Φ - שטף הקרינה

S - שטח המשטח

$$E = \frac{\Phi}{S} \qquad (2)$$



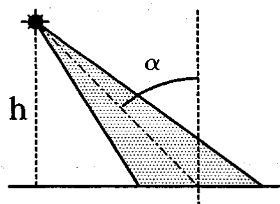
<u>**נוסחת הארת המשטח:**</u>

I - עוצמת האור

h - גובה

α - זווית הפגיעה

$$E = \frac{I}{h^2} \bullet \cos^3\alpha \qquad (3)$$



* הסדרה מיועדת לתלמידים, המתכוננים למבחן בגרות ברמה של 5 יח"ל

בעיה מקור אור נקודתי S, שעוצמתו I=25cd נמצא מעל משטח מישורי MN בגובה h מעליו (ראה איור 1).

ערכי עוצמת המקור, הגבהים ויתר הנתונים הנדרשים להתרת הבעיה מובאים למטה.

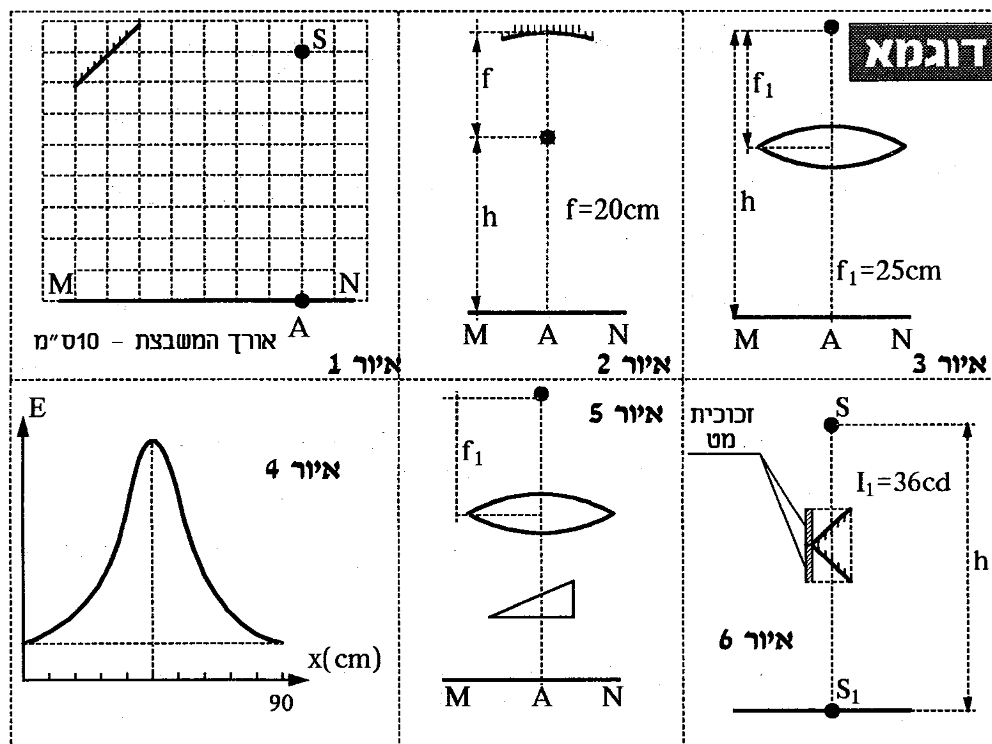
שאלות

1. חשב את הארת המשטח MN בנקודה A.
2. ממקמים מראה מישורית, כבאיור 1.
   חשב את הארת המשטח MN בנקודה A.
3. ממקמים מראה כדורית בעלת מרחק המוקד f מעל מקור האור כך שמוקד המראה מתלכד עם מקור האור (איור 2). חשב את הארת המשטח MN בנקודה A.
4. מחליפים את המראה הכדורית בעדשה מרכזת בעלת מרחק המוקד f_1. מוקד העדשה מתלכד עם מקור האור (ראה איור 3). חשב את הארת המשטח בנקודה A.
5. משנים את מרחק מקור האור מהמשטח. מרחיקים את העדשה ממקור האור ומקרבים למשטח ובודקים את הארת המשטח בנקודה A. גרף התלות של הארת המשטח בנקודה A

במרחק המקור מהעדשה מובא באיור 4. קבע את המרחק החדש בין העדשה לבין המשטח MN.

6. **בין העדשה והמשטח ממקמים מנסרה משולשת (ראה איור 5) תאר באופן איכותי בלבד את גרף השינוי של הארת המשטח לאורך המשטח MN.**

7. **ממקמים בנקודה A מקור אור שני, שעוצמתו I_1. בין שני המקורות ממקמים מערכת אופטית להשוואת עוצמות האור של שני המקורות (ראה איור 6). קבע את המקום בו יש להציב את המערכת, כדי שהארת שתי זכוכיות מט תהיה שווה.**

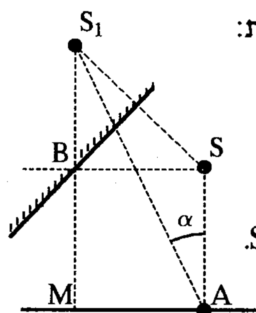


פתרון

1. מאיור 1 קובעים שמרחק h ממקור האור לנקודה A הוא 80 ס"מ. זווית הפגיעה שווה ל-0^0 (הרי $SA \perp MN$). בהתאם לנוסחה (3), הארת המשטח MN בנקודה A היא:

$$E = \frac{I}{h^2} \bullet \cos^3\alpha = \frac{25cd}{(0.8m)^2} \bullet \cos^3(0^0) = 39\,lux$$

2. העמדת מראה מישורית בקירבת מקור האור יוצרת מקור אור נוסף, המהווה דמות של מקור האור הראשון במראה המישורית. לפיכך, הארת המשטח בנקודה A שווה כעת לסכום ההארות הנוצרות על ידי שני המקורות:



$$E_r = E + E_1$$

כאן E_r היא הארת המשטח השקולה, E - הארת המשטח הנוצרת על ידי המקור S ו- E_1 - הארת המשטח הנוצרת על ידי המקור S_1.

מהאיור קובעים, שמרחק המקור S_1 מהמשטח הוא:

$$h_1 = |MS_1| = |BS| + |MB| = 0.6m + 0.8m = 1.4m$$

כמו כן,

$$\cos\alpha = \frac{|MS_1|}{|AS_1|} = \frac{1.4m}{\sqrt{(1.4m)^2+(0.6m)^2}} = 0.92$$

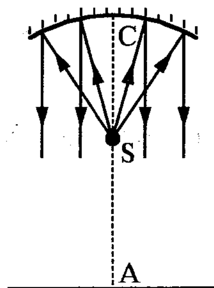
הצבת הערכים עבור h_1 ועבור $\cos\alpha$ בנוסחה (3) גוררת:

$$E_1 = \frac{I}{h_1^2} \bullet \cos^3\alpha = \frac{25cd}{(1.4m)^2} \bullet (0.92)^3 = 9.9\,lux$$

מאחר ו- $E=39lux$ (ראה שאלה 2), מהביטוי עבור E_r נקבל:

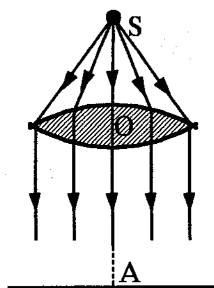
$$E_r = E + E_1 = 39\,lux + 9.9\,lux = 48.9\,lux$$

3. הארת המשטח בנקודה A שווה להארת המשטח בנקודה זו, הנוצרת על ידי מקור האור S, וההארה בנקודה C, שהיא קוטב המראה הכדורית. הקרניים היוצאות מהמקור ומתפשטות לכיוון המראה, מוחזרות בצורת אלומת קרניים מקבילות (ראה את מהלכי הקרניים המיוחדות בסדרה 2). בהתאם לנוסחה (2), ההארה נשארת קבועה, אם שטף הקרינה והשטח אינם משתנים. במקרה הנדון, השטף ושטח המוקרן אינם משתנים ולכן הארת המשטח בנקודה A היא:



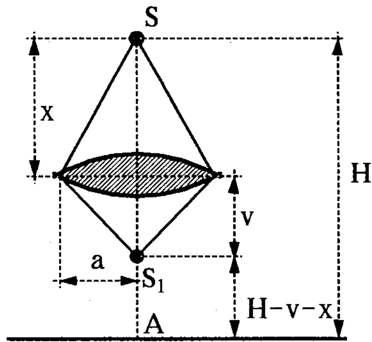
$$E_r = E + E_C = \frac{I}{h^2} + \frac{I}{f^2} = \frac{25cd}{(0.8m)^2} + \frac{25cd}{(0.2m)^2} = 664\,lux$$

4. הארת המשטח בנקודה A שווה להארה בנקודה O, שהיא המרכז האופטי של העדשה. הקרניים היוצאות מהמקור ומתפשטות לכיוון העדשה, מתפשטות, לאחר העדשה, בצורת אלומת קרניים מקבילות. לכן ההארה נשארת קבועה (ראה הסבר לשאלה הקודמת) ובנקודה A של המשטח MN היא:



$$E_A = \frac{I}{f_1^2} = \frac{25cd}{(0.25m)^2} = 400\,lux$$

5. נסמן את מרחק מקור האור מהעדשה ב-x ונקבל ביטוי עבור הארת המשטח



כפונקציה של x. האיור מראה שמרחק מקור האור החדש (שהוא, בעצם, הדמות של המקור S) מהמשטח הוא: $|AS_1|=H-v-x$. את מרחק הדמות מהעדשה

נקבל מנוסחה (1) שבסדרה 6: $v = \dfrac{xf_1}{x-f_1}$.

נציב את הביטוי עבור v בביטוי עבור $|AS_1|$ ונקבל:

$$|AS_1| = \frac{H(x-f_1) - x^2}{x-f_1}$$

מנוסחה (1) נובע, שעוצמת האור של מקור האור החדש משתנה, כי משתנה הזווית המרחבית בה מתפשט האור. הזווית המרחבית בה מתפשט האור מהמקור S היא:

$\dfrac{\pi a^2}{x^2} = \Omega$, והזווית בה מתפשט האור ממקור S_1 היא: $\dfrac{\pi a^2(x-f_1)^2}{(xf_1)^2} = \dfrac{\pi a^2}{v^2} = \Omega_1$.

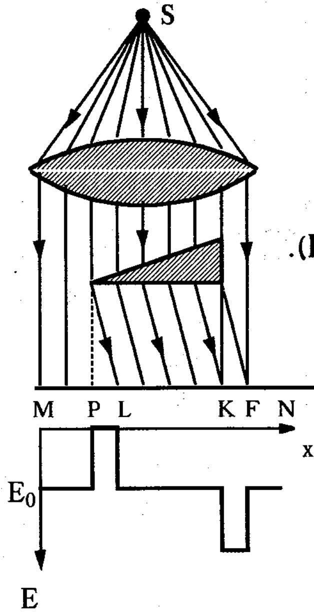
לכן עוצמת האור של המקור S_1 היא:

$$I_1 = \frac{\Phi}{\Omega_1} = \frac{I\Omega}{\Omega_1} = \frac{I\pi a^2(xf_1)^2}{x^2\pi a^2(x-f_1)^2} = \frac{If_1^2}{(x-f_1)^2}$$

נציב את הביטויים עבור $|AS_1|$ ו-I_1 בנוסחה (3) ונקבל את הפונקציה המבוקשת:

$$E(x) = \frac{I_1}{|AS_1|^2} = \frac{If_1^2}{\left[H(x-f_1)-x^2\right]^2}$$

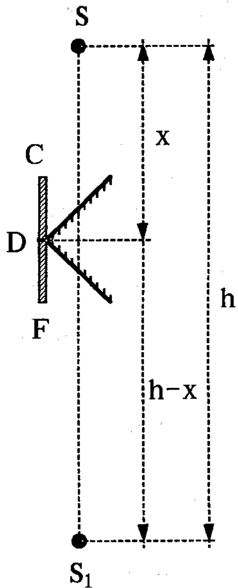
מחקירת הפונקציה עולה שבנקודה $x = \frac{H}{2}$ יש לה מקסימום, ואז מהגרף שבאיור 4 קובעים: $H = 90cm$.



6. מהלך קרניים במערכת "מקור אור - עדשה - מנסרה - מסך" וגרף התלות $E=f(x)$ מובאים באיור.

מסקנות:

* הארה בתוך אלומה, היוצאת מהעדשה אינה משתנה (E_0).
* הארת המשטח לאורך הקטע MP היא E_0.
* הארת המשטח לאורך הקטע PL היא 0 (האור אינו מגיע למשטח עקב שבירתו במנסרה).
* הארת המשטח לאורך הקטע LK היא E_0.
* הארת המשטח לאורך הקטע KF היא $2E_0$.



7. נסמן ב-x את מרחק מקור האור S מהמערכת ונרשום את הנוסחה (3) עבור הארת המשטחים CD ו- DF:

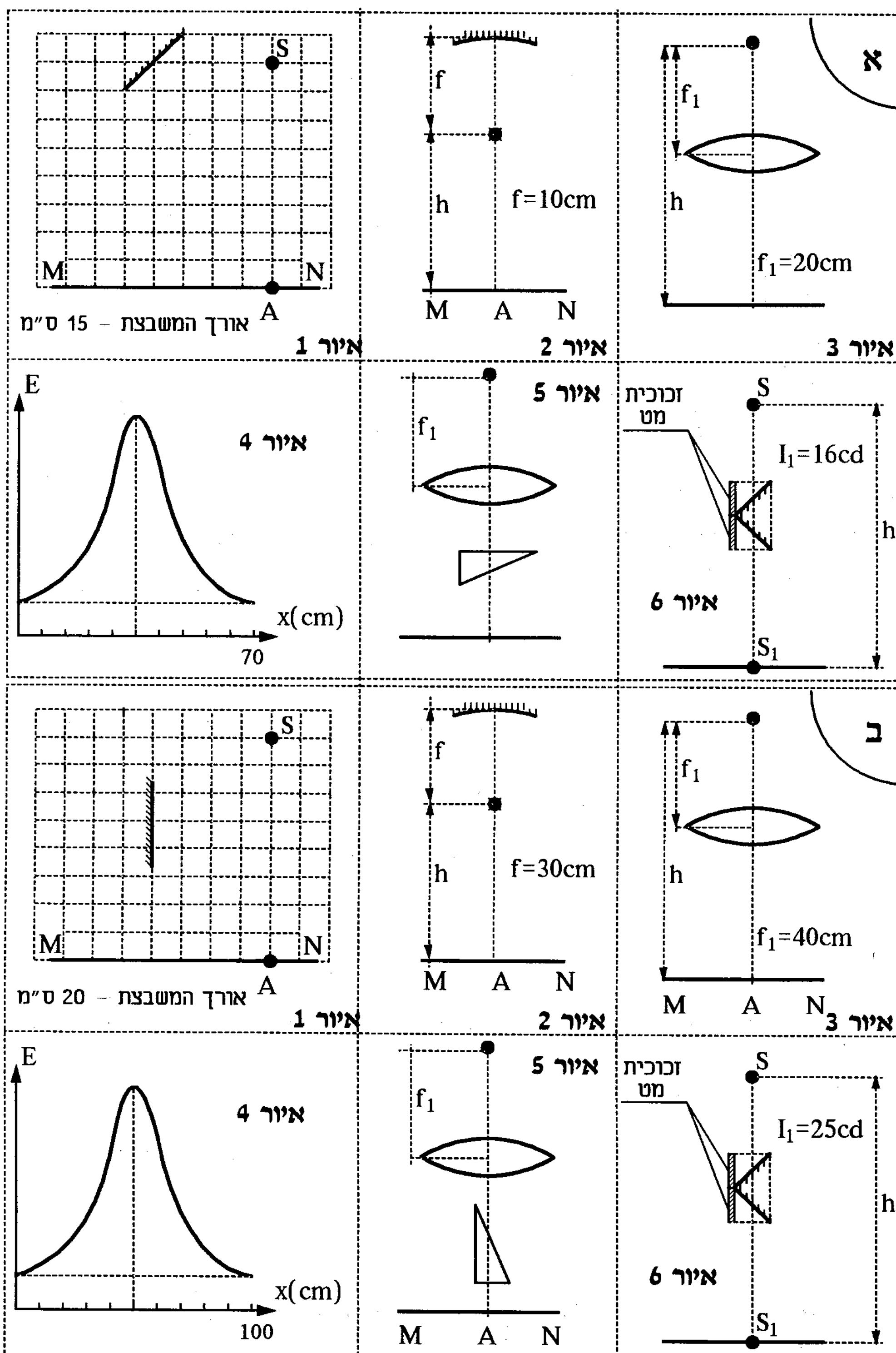
$$E_{CD} = \frac{I}{x^2} \quad ,E_{DF} = \frac{I_1}{(h-x)^2}$$

לפי תנאי הבעיה, הארת שני המשטחים הנ"ל שווה:

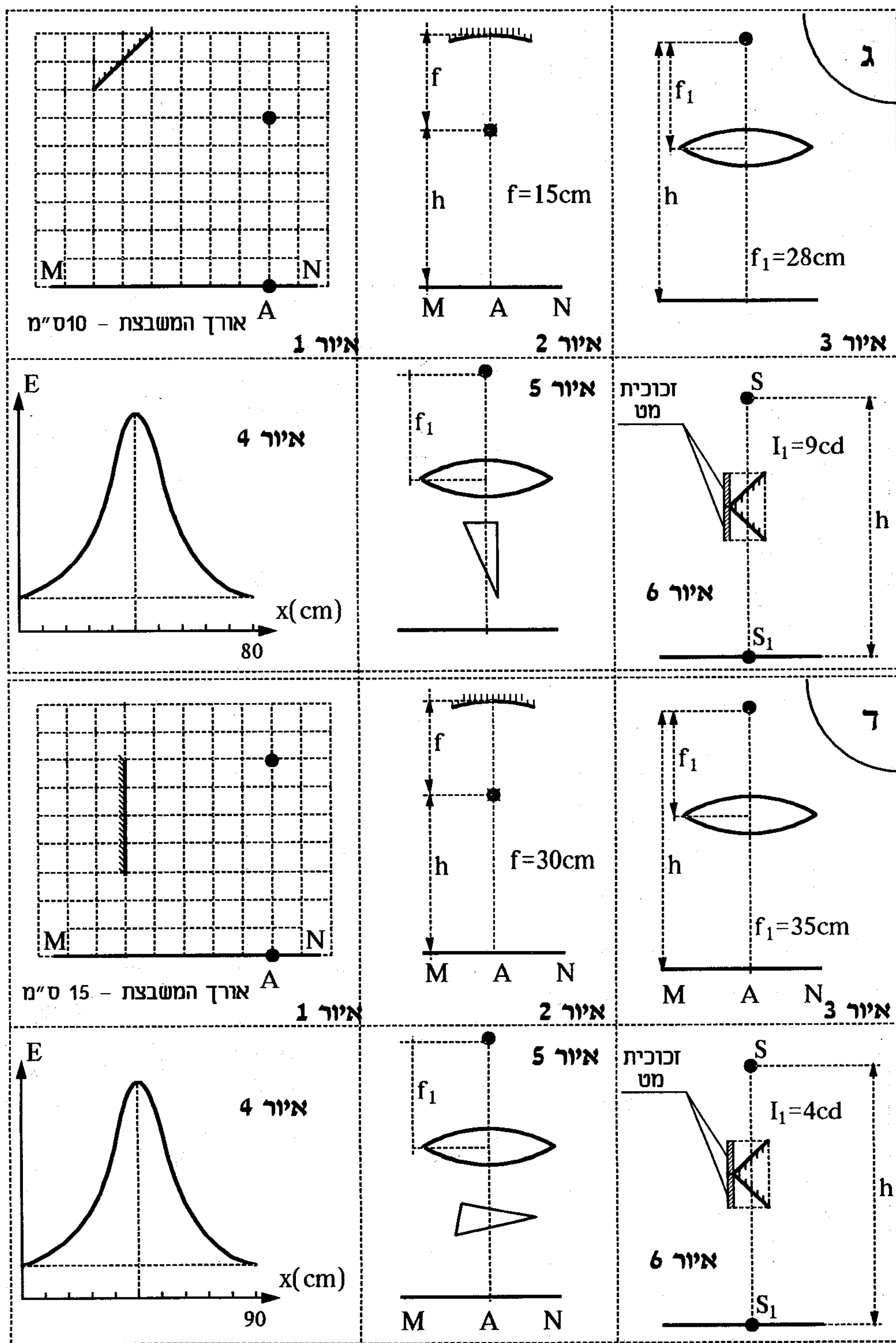
$$E_{CD} = E_{DF}$$

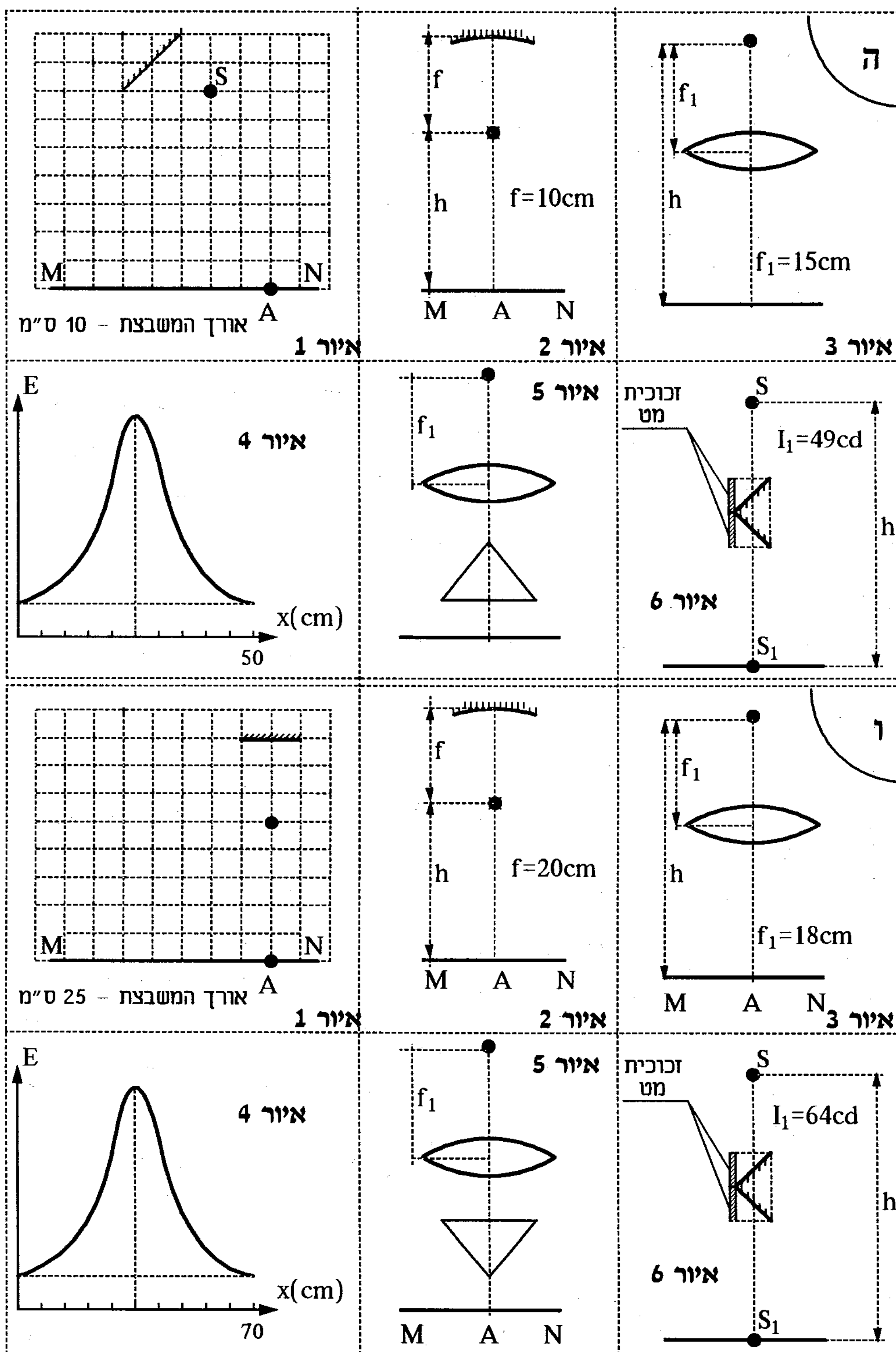
הצבת הביטוים עבור E_{CD} ו- E_{DF} בשיוויון האחרון גוררת:

$$\frac{I}{x^2} = \frac{I_1}{(h-x)^2} \implies x = \frac{I \pm \sqrt{I \bullet I_1}}{I - I_1} \bullet h = 0.36m$$

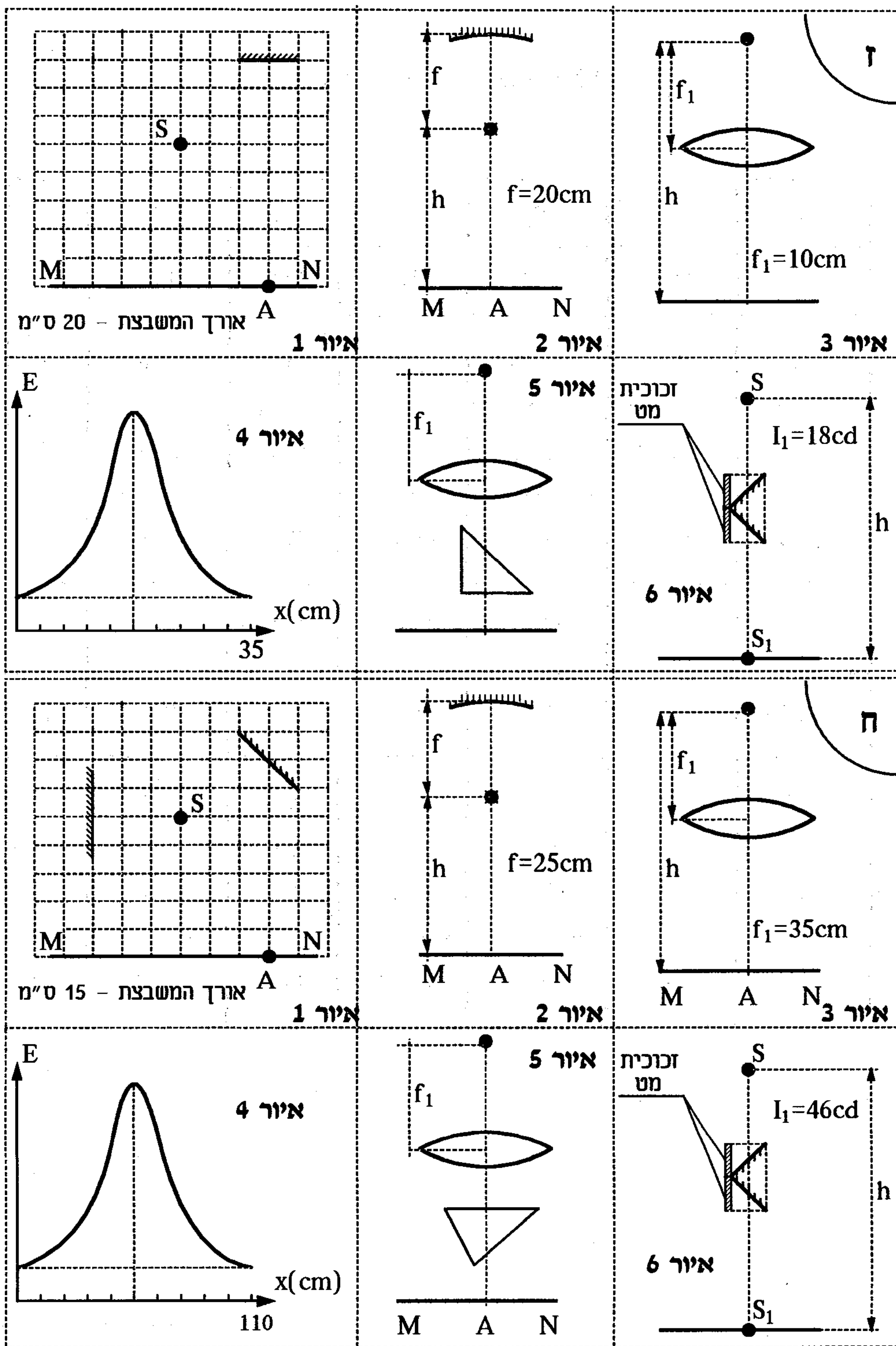


א
S
M
N
A
אורך המשבצת - 15 ס"מ
איור 1
f
h
f=10cm
M A N
איור 2
f_1
h
f_1=20cm
איור 3
E
איור 4
x(cm)
70
f_1
איור 5
זכוכית מט
S
I_1=16cd
h
איור 6
S_1
ב
S
M
N
A
אורך המשבצת - 20 ס"מ
איור 1
f
h
f=30cm
M A N
איור 2
f_1
h
f_1=40cm
M A N
איור 3
E
איור 4
x(cm)
100
f_1
איור 5
M A N
זכוכית מט
S
I_1=25cd
h
איור 6
S_1


ג
M
N
A
אורך המשבצת - 10ס"מ
איור 1
f
h
f=15cm
M
A
N
איור 2
f_1
h
f_1=28cm
איור 3
E
איור 4
x(cm)
80
איור 5
f_1
זכוכית
מט
S
I_1=9cd
h
איור 6
S_1
ד
M
N
A
אורך המשבצת - 15 ס"מ
איור 1
f
h
f=30cm
M
A
N
איור 2
f_1
h
f_1=35cm
M
A
N
איור 3
E
איור 4
x(cm)
90
איור 5
f_1
M
A
N
זכוכית
מט
S
I_1=4cd
h
איור 6
S_1



ה
M
N
S
A
אורך המשבצת - 10 ס"מ
איור 1
f
h
f=10cm
M A N
איור 2
f_1
h
f_1=15cm
איור 3
E
איור 4
x(cm)
50
איור 5
f_1
זכוכית
מט
S
I_1=49cd
h
איור 6
S_1
M
N
A
אורך המשבצת - 25 ס"מ
איור 1
f
h
f=20cm
M A N
איור 2
ו
f_1
h
f_1=18cm
M A N
איור 3
E
איור 4
x(cm)
70
איור 5
f_1
M A N
זכוכית
מט
S
I_1=64cd
h
איור 6
S_1


ז
ח
איור 1
איור 2
איור 3
איור 4
איור 5
איור 6
אורך המשבצת – 20 ס"מ
אורך המשבצת – 15 ס"מ
f=20cm
f=25cm
f1=10cm
f1=35cm
I1=18cd
I1=46cd
זכוכית מט
x(cm)
35
110
E
S
S1
M
A
N
f
h
f1

דף תשובות לסדרה "פוטומטריה."

x	H	E_A	E_r	E_1	E	
m	cm	lux	lux	lux	lux	
0.67	70.0	625.0	2517.4	24.0	17.4	א
0.80	100.0	156.3	287.5	13.2	9.77	ב
0.38	80.0	319.0	1180.5	79.5	69.4	ג
0.75	90.0	204.1	300.5	27.0	22.7	ד
0.30	50.0	1111.1	2545.4	63.3	45.4	ה
0.48	70.0	771.6	641.0	19.3	16.0	ו
0.54	35.0	2500.0	640.8	20.4	15.8	ז
0.32	110.0	204.1	428.0	43.6	28.0	ח

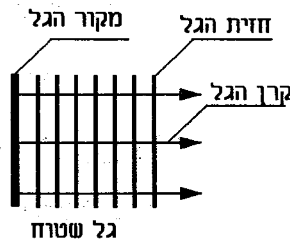
11. גלים מכניים. מאפייני הגלים

מושגים ונוסחאות עיקריים.

גלים - הפרעות במצב של חומר או של שדה, המתפשטות במרחב ובזמן.

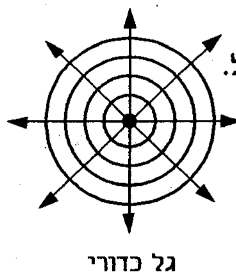
גלים מכניים - הפרעות מכניות (דפורמציות) המתפשטות בחומר.

חזית הגל - מקום גיאומטרי של נקודות ,אליהן הגיע הגל ברגע מסויים.



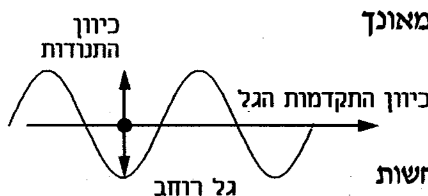
קרן הגל - קו, שמשיק אליו בכל נקודה מתלכד עם כיוון התקדמות הגל.

גל שטוח - גל, שחזיתו נמצא במישור המאונך לכיוון התקדמות הגל.

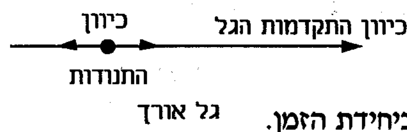


גל מעגלי - גל, שחזיתו נמצא על משטח כדורי, וקרני הגל מכוונות לאורך הרדיוסים מהמרכז (בו ממוקם מקור הגל).

גל רוחב - גל, בו כיוון התנודות של חלקיקי החומר מאונך לכיוון התקדמות הגל.



גל אורך - גל, בו התנודות של חלקיקי החומר מתרחשות בכיוון התקדמות הגל.



מהירות הגל - גודל פיזיקלי, שהערך המספרי שלו שווה למרחק, שעוברת נקודה כלשהי של חזית הגל ביחידת הזמן.

<u>אורך הגל</u> - המרחק בין שתי נקודות הקרובות ביותר אשר מתנודדות באותו מופע (מופע הוא גודל שמאפיין את התרחקות הנקודה ממצב שיווי משקל).

<u>זמן מחזור</u> - פרק זמן שבמהלכו הגל עובר מרחק השווה לאורך הגל.

<u>תדירות</u> - מספר מחזורים ביחידת הזמן.

<u>אמפליטודה (משרעת)</u> - ההתרחקות המקסימלית של חלקיק מתנודד.

<u>קשר בין מהירות הגל, אורך הגל וזמן המחזור (תדירות):</u>

λ - אורך הגל

T - זמן המחזור

υ - מהירות הגל

f - תדירות

$$\lambda = \upsilon T = \frac{\upsilon}{f} \quad (1)$$

<u>משוואת הגל השטוח:</u>

A - אמפליטודה

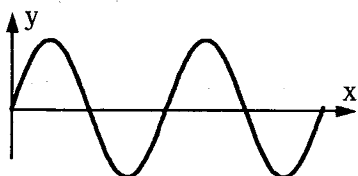
ω - תדירות זוויתית

t - זמן

υ - מהירות הגל

φ - מופע התחלתי

$$y = A\sin\left[\omega\left(t-\frac{x}{\upsilon}\right)+\varphi\right] \quad (2)$$



<u>אפקט (תוצא) דופלר [Doppler]:</u>

f - התדירות הנקלטת

f_0 - התדירות הנפלטת

υ - מהירות הגל

u_0 - מהירות מקור הגל

u - מהירות הקולט

$$f = f_0 \bullet \frac{\upsilon \pm u}{\upsilon \mp u_0} \quad (3)$$

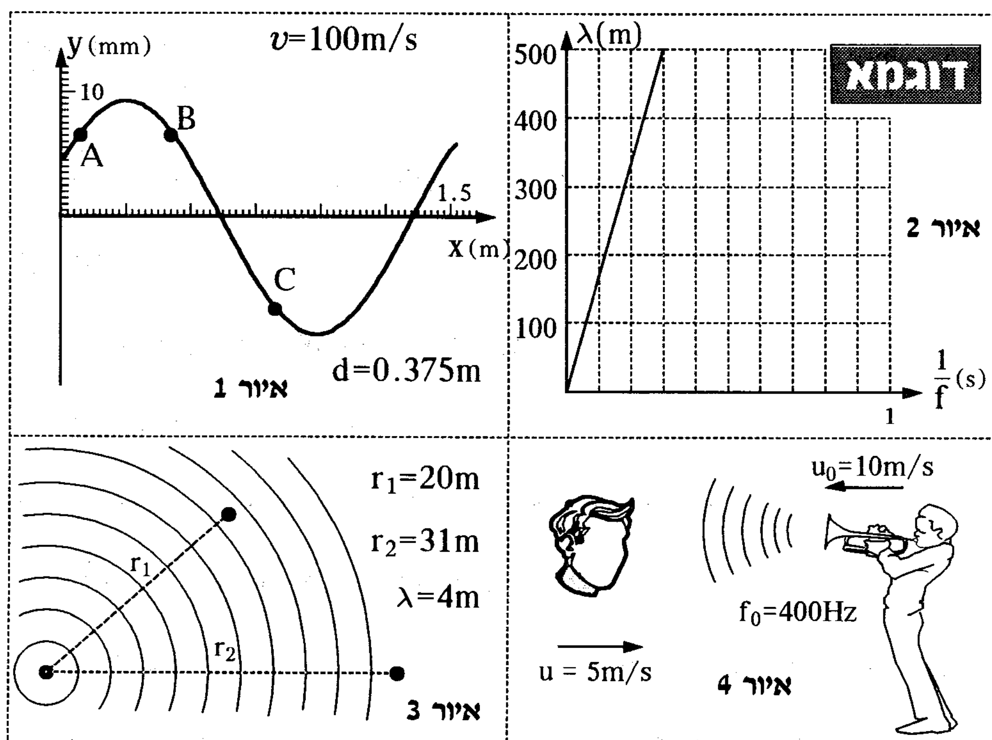
הסימן העליון להתקרבות היחסית,
הסימן התחתון להתרחקות היחסית

בעיה באיור 1 מובא "תצלום רגעי" של גל חד ממדי.
הגל מתפשט ימינה במהירות υ.

שאלות

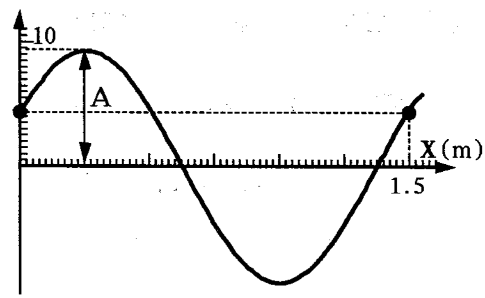
1. קבע מהאיור את אמפליטודת הגל.
2. מהו אורך הגל ?
3. חשב את זמן המחזור והתדירות.
4. רשום את משוואת הגל.
5. סמן את וקטורי המהירויות של הנקודות A,B,C (ראה איור 1). הניח שהגל הוא גל רוחב.
6. קבע את הפרש המופע עבור נקודות, שהמרחק ביניהן הוא d.
7. השווה את המהירות המקסימלית של החלקיקים בגל ואת מהירות התקדמות הגל.
8. קבע מתוך הגרף, שבאיור 2 את המהירות של גל קול.
9. קבע את הפרש המופע עבור נקודות 1 ו-2, אם מרחקי מקור הגל המעגלי מהנקודות הללו הם r_1 ו-r_2, ואורך הגל הוא λ (ראה איור 3).

10. המקור של גל קול, שתדירותו f נע ביחס לקולט. חשב את התדירות הנקלטת, אם מהירות הקול באוויר 340 מטר לשנייה (ראה איור 4).



פתרון

1. על פי איור 1 ההתרחקות המקסימלית של חלקיק מתנודד ממצב שיווי המשקל היא האמפליטודה השווה ל- $A=9.5mm$.



2. לקביעת אורך הגל, נבחר באיור שתי נקודות המתנודדות באותו מופע (ראה איור) ונחשב את המרחק ביניהן: $\lambda=1.5m$

3. בהתאם לנוסחה (1), זמן המחזור והתדירות הם:

$$T = \frac{\lambda}{v} = \frac{1.5m}{100m/s} = 0.015s, \quad f = \frac{v}{\lambda} = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.015s} = 66.67s^{-1}$$

4. לפי נוסחה (2), משוואת הגל הינה מהצורה:

$$(*) \qquad y = A\sin\left[\omega(t-\frac{x}{v})+\varphi\right] = 0.095\bullet\sin\left[2\pi f(t-\frac{x}{100})+\varphi\right] =$$
$$= 0.095\bullet\sin\left[133.3\pi(t-\frac{x}{100})+\varphi\right]$$

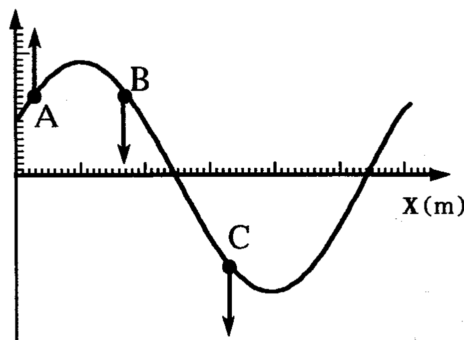
לחישב המופע ההתחלתי φ, נקבע תחילה מהאיור 1 את המופע ההתחלתי של נקודה ברגע $t=0$: $y_{t=0}=4.5mm$. נציב את הערך הזה במשוואה של תנועה הרמונית $y = A\sin(\omega t+\varphi)$ ונקבל:

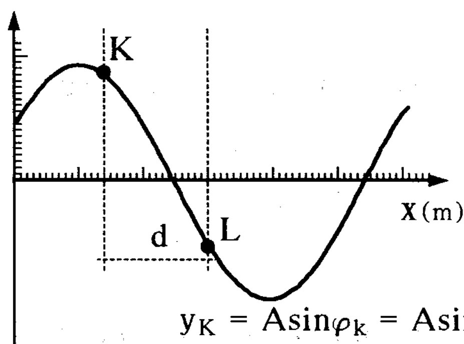
$$4.5 = 9.5\sin\varphi \Longrightarrow \varphi = 0.157\pi$$

הצבת φ במשוואה (*) מביאה לתוצאה:

$$y = 0.095\bullet\sin\left[133.3\pi(t-\frac{x}{100})+0.157\pi\right]$$

5. באיור מובאים וקטורי המהירויות של הנקודות: A,B,C





6. נבחר באקראי שתי נקודות K ו-L, שמרחק ביניהן הוא d, ונרשום את משוואת התנועה ההרמונית לשתי הנקודות האלו:

$$y_K = A\sin\varphi_K = A\sin(\omega t+\varphi_{0K}) = A\sin(\omega t+2\pi\bullet\frac{x_k}{\lambda})$$

$$y_L = A\sin\varphi_L = A\sin(\omega t+\varphi_{0L}) = A\sin(\omega t+2\pi\bullet\frac{x_L}{\lambda})$$

מכאן הפרש המופע בין שתי הנקודות K ו-L הוא:

$$\Delta\varphi = \varphi_L - \varphi_k = 2\pi\bullet\frac{x_L - x_k}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} = \frac{2\pi\bullet 0.375m}{1.5m} = \frac{\pi}{2}$$

7. מהירות החלקיק המשתתף בתנועה הרמונית היא:

$$v = A\omega\sin(\omega t+\varphi)$$

מאחר והערך המקסימלי של פונקציית הסינוס הוא אחד, המהירות המקסימלית היא:

$$v_{max} = A\omega = 2\pi fA = 2\bullet 3.14\bullet 66.67\frac{1}{s}\bullet 0.095m = 39.8\frac{m}{s}$$

8. על פי נוסחה (1), מהירות הגל היא:

$$v = \lambda f = \frac{\lambda}{\frac{1}{f}}$$

הביטוי האחרון מראה, ששיפוע הגרף המובא באיור 2 שווה לערכו המספרי של מהירות גל קול. השיפוע של הגרף שבאיור 2 הוא 1500 ולכן מהירות הגל היא:

$$v=1500\frac{m}{s}$$

9. הפרש הדרכים (ההפרש הגיאומטרי של מרחקי הנקודות ממקור הגל) בין שתי נקודות הנתונות הוא:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = 31m - 20m = 11m$$

הפרש המופע בין שתי הנקודות לעיל הוא:

$$\Delta\varphi = 2\pi \bullet \frac{r_2 - r_1}{\lambda} = 2\pi \bullet \frac{11m}{4m} = 5.5\pi$$

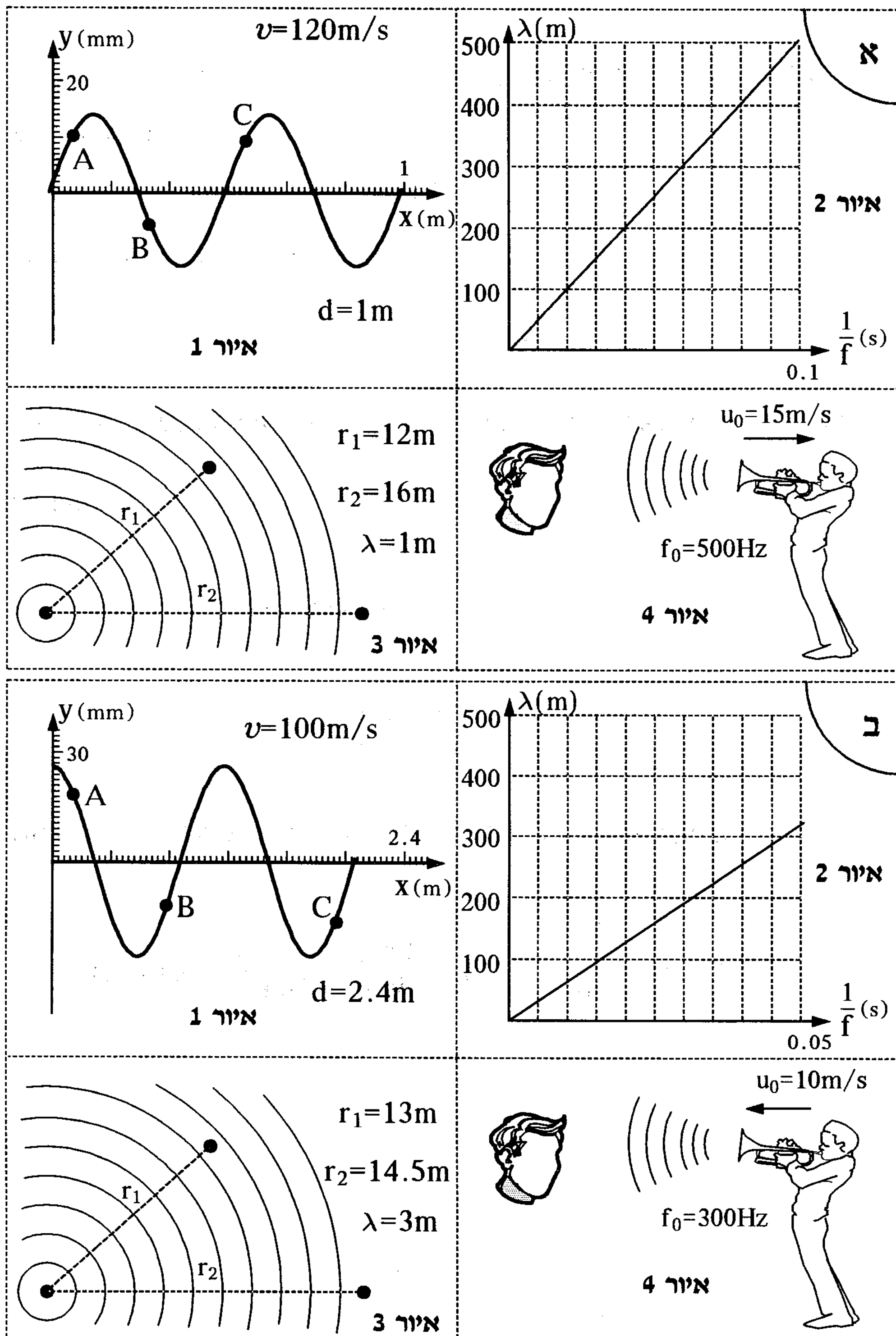
נחסיר מספר שלם של המחזורים ($2 \bullet 2\pi$), ונקבל שהפרש המופע בין שתי הנקודות הנתונות הוא $\frac{3}{2}\pi$.

10. לפי הנוסחה (3), התדירות הנקלטת היא:

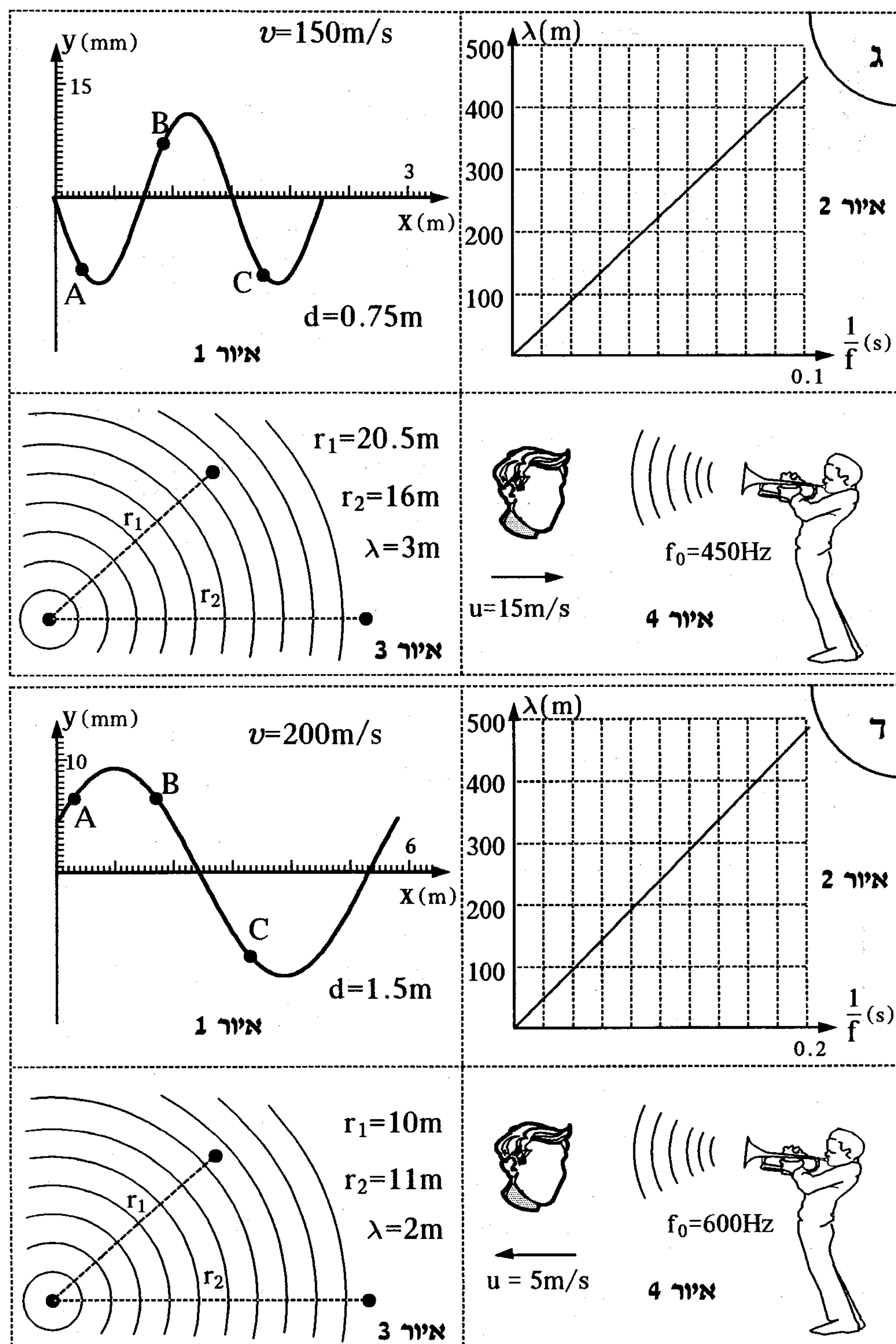
$$f = f_0 \bullet \frac{v \pm u}{v \mp u_0}$$

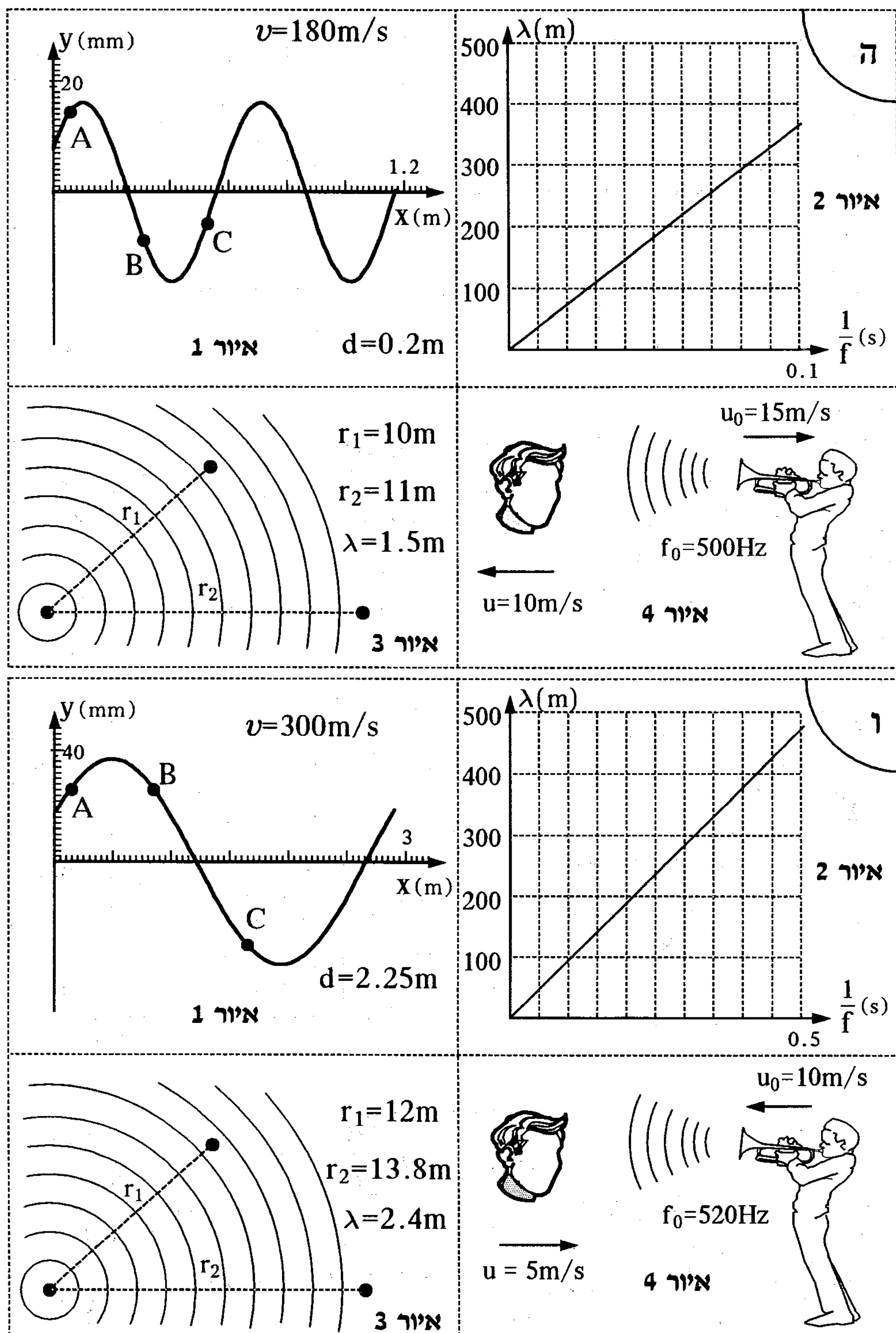
היות והמקור והקולט מתקרבים, יש לבחור בנוסחה הנ"ל את הסימן העליון:

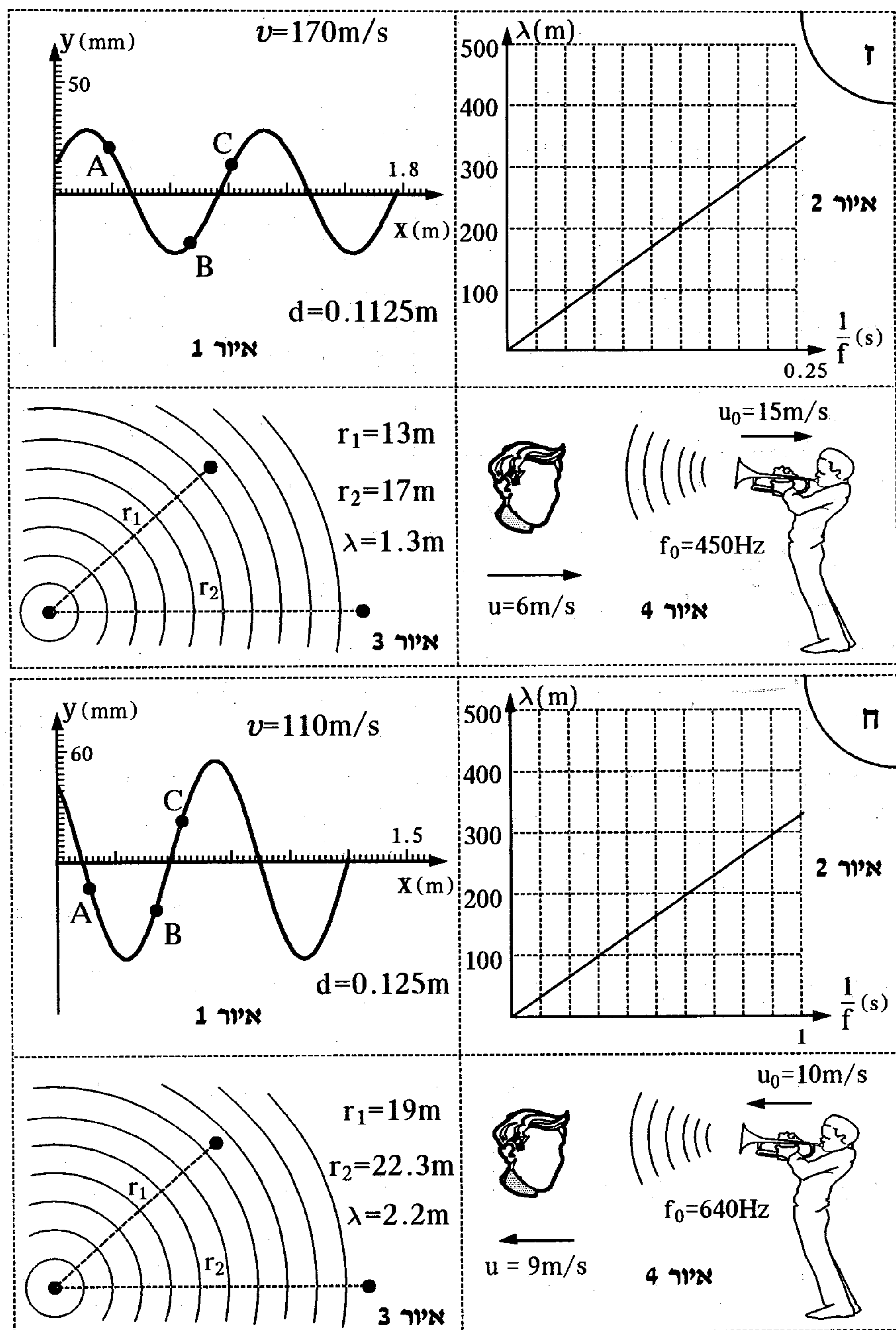
$$f = f_0 \frac{v + u}{v - u_0} = 400Hz \bullet \frac{340m/s + 5m/s}{340m/s - 10m/s} = 418.2Hz$$



א
v=120m/s
y (mm)
20
A
B
C
1
x (m)
d=1m
איור 1
λ(m)
500
400
300
200
100
0.1
1/f (s)
איור 2
r₁=12m
r₂=16m
λ=1m
r₁
r₂
איור 3
u₀=15m/s
f₀=500Hz
איור 4
ב
v=100m/s
y (mm)
30
A
B
C
2.4
x (m)
d=2.4m
איור 1
λ(m)
500
400
300
200
100
0.05
1/f (s)
איור 2
r₁=13m
r₂=14.5m
λ=3m
r₁
r₂
איור 3
u₀=10m/s
f₀=300Hz
איור 4


ג
y (mm)
15
v=150m/s
B
3
x (m)
A
C
d=0.75m
איור 1
λ(m)
500
400
300
200
100
0.1
$\frac{1}{f}$ (s)
איור 2
r_1=20.5m
r_2=16m
λ=3m
r_1
r_2
איור 3
f_0=450Hz
u=15m/s
איור 4
ד
y (mm)
10
v=200m/s
A
B
6
x (m)
C
d=1.5m
איור 1
λ(m)
500
400
300
200
100
0.2
$\frac{1}{f}$ (s)
איור 2
r_1=10m
r_2=11m
λ=2m
r_1
r_2
איור 3
f_0=600Hz
u = 5m/s
איור 4


ה
v=180m/s
y (mm)
20
A
B
C
1.2
x (m)
d=0.2m
איור 1
λ(m)
500
400
300
200
100
0.1
1/f (s)
איור 2
r_1=10m
r_2=11m
λ=1.5m
r_1
r_2
איור 3
u_0=15m/s
f_0=500Hz
u=10m/s
איור 4
ו
v=300m/s
y (mm)
40
A
B
C
3
x (m)
d=2.25m
איור 1
λ(m)
500
400
300
200
100
0.5
1/f (s)
איור 2
r_1=12m
r_2=13.8m
λ=2.4m
r_1
r_2
איור 3
u_0=10m/s
f_0=520Hz
u = 5m/s
איור 4


ז
y (mm)
50
v=170m/s
A
B
C
1.8
x (m)
d=0.1125m
איור 1
λ(m)
500
400
300
200
100
0.25
1/f (s)
איור 2
r_1=13m
r_2=17m
λ=1.3m
r_1
r_2
איור 3
u_0=15m/s
f_0=450Hz
u=6m/s
איור 4
ח
y (mm)
60
v=110m/s
A
B
C
1.5
x (m)
d=0.125m
איור 1
λ(m)
500
400
300
200
100
1
1/f (s)
איור 2
r_1=19m
r_2=22.3m
λ=2.2m
r_1
r_2
איור 3
u_0=10m/s
f_0=640Hz
u = 9m/s
איור 4

דף תשובות לסדרה "גלים מכניים. מאפייני הגלים"

f_1	$\Delta\varphi_1$	v	v_{max}	$\Delta\varphi$	f	T	λ		
Hz		$\frac{m}{sec}$	$\frac{m}{sec}$		Hz	msec	m	mm	
478.9	0	5000	21.1	0	240	4.17	0.5	14.0	א
309.1	π	6500	14.13	0	83.3	12.0	1.2	27.0	ב
469.9	π	4440	7.07	π	100	10.0	1.5	11.25	ג
591.2	π	2400	1.99	$\frac{\pi}{2}$	33.3	30.0	6.0	9.5	ד
464.8	$\frac{4\pi}{3}$	3600	30.15	$\frac{2\pi}{3}$	300	3.33	0.6	16.0	ה
543.6	1.5π	950	23.88	$\frac{3\pi}{2}$	100	10.0	3.0	38.0	ו
423.4	0.15π	1360	35.63	$\frac{\pi}{4}$	189	5.3	0.9	30.0	ז
676.8	π	330	52.63	$\frac{\pi}{3}$	147	6.8	0.75	57.0	ח

משוואות (שאלה 4) -

א. $y=14\bullet 10^{-3}\sin\left[1508(t-\frac{x}{120})\right]$

ב. $y=27\bullet 10^{-3}\sin\left[523.5(t-\frac{x}{100})+0.47\pi\right]$

ג. $y=11.25\bullet 10^{-3}\sin\left[628.3(t-\frac{x}{150})+\pi\right]$

ד. $y=9.5\bullet 10^{-3}\sin\left[209.2(t-\frac{x}{200})+0.8\pi\right]$

ה. $y=16\bullet 10^{-3}\sin\left[1885(t-\frac{x}{180})+0.8\pi\right]$

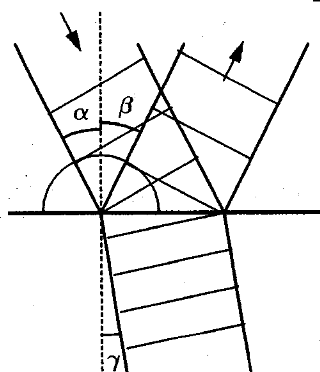
ו. $y=38\bullet 10^{-3}\sin\left[628.3(t-\frac{x}{300})+0.8\pi\right]$

ז. $y=3\bullet 10^{-2}\sin\left[1187.5(t-\frac{x}{170})+1.86\pi\right]$

ח. $y=57\bullet 10^{-3}\sin\left[923.6(t-\frac{x}{110})+1.3\pi\right]$

.12 גלים מכניים.
תכונות הגלים

מושגים ונוסחאות עיקריים.



החזרה ושבירה של גלים -בקו הגבול המפריד בין שני תווכים, מתרחשות תופעות של החזרה חלקית של הגל ושל חדירה חלקית לתווך שני עם שינוי בכיוון התפשטות הגל.

חוק ההחזרה - זווית הפגיעה שווה לזווית השבירה:

$$\alpha = \beta \quad (1)$$

חוק השבירה - יחס הסינוסים של זוויות הפגיעה והשבירה שווה ליחס המהירויות בתווכים.

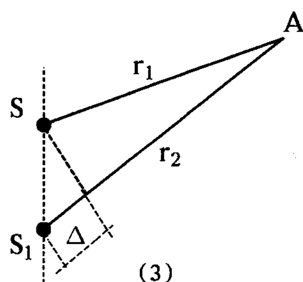
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

עיקרון הסופרפוזיציה [superposition] - בהתפשטות בו זמנית של מספר גלים באותו אזור, כל אחד מהם מתפשט באותו אופן, בו הוא היה מתפשט בהעדר גלים אחרים. ההפרעה השקולה בכל נקודת האזור שווה לסכום הפרעות הנוצרות על ידי כל אחד מהגלים.

קוהרנטיות [coherence] **מקורות הגלים** - מקורות הגלים (וגם הגלים שנוצרים על ידם) נקראים קוהרנטיים, אם הפרש המופע של הגלים אינו תלוי בזמן, והתדירויות שלהם שוות.

התאבכות [interference] **של גלים** - התחברות של שניים (או יותר) גלים, בה נוצרת התפלגות האמפליטודות של התנודות השקולות הקבועה בזמן.

ההתאבכות אפשרית בהתחברות של גלים קוהרנטיים.



הפרש הדרכים -ההפרש הגיאומטרי של מרחקי מקורות הגלים מנקודה מסויימת.

$$\Delta = r_2 - r_1$$

התאבכות בונה - התחברות גלים בה מתקבלת אמפליטודה מקסימלית.

תנאי להתאבכות בונה:

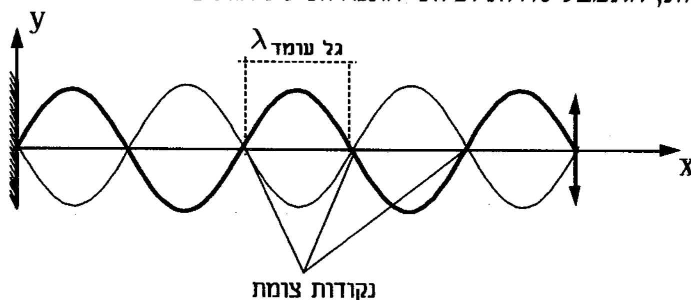
$$\Delta = k\bullet\lambda \qquad k=0,\pm1,\pm2,\ \ldots \tag{4}$$

התאבכות הורסת - התחברות גלים בה מתקבלת אמפליטודה מינימלית.

תנאי להתאבכות הורסת:

$$\Delta = (2k+1)\bullet\frac{\lambda}{2} \qquad k=0,\pm1,\pm2,\ \ldots \tag{5}$$

גל עומד - תוצאת ההתאבכות של שני גלים, המתפשטים בכיוונים מנוגדים בתנאי, שהתדירויות, האמפליטודות וכיווני התנודות של הגלים זהים.



נקודת צומת - נקודה בה מתקיימת התאבכות הורסת.

אורך הגל העומד - המרחק בין שתי נקודות הצומת הסמוכות.

λ - אורך גל מתקדם

$$\lambda_{\text{גל עומד}} = \frac{\lambda}{2} \qquad (6)$$

המשוואה של גל עומד:

A - אמפליטודה

ω - תדירות מעגלית

v - מהירות הגל

t - זמן

$$y(x,t) = 2A \bullet \sin\frac{\omega x}{v} \bullet \sin\omega t \qquad (7)$$

עקיפת גלים [diffraction] - סטיית הגלים מהתפשטותם לאורך קו ישר, עקיפת מכשולים והחדרתם לתחום של הצל הגיאומטרי.

מהירות גלים במים:

g - תאוצת הנפילה החופשית

h - עומק המים

$$v = \sqrt{gh} \qquad (8)$$

הנוסחה הנ"ל נכונה בתנאי $0 < h < \lambda$

בעיה **תלמיד מבצע מספר ניסויים באמבט גלים. התדירות של מחולל הגלים ניתנת לשינוי. גובה המים באמבט h. תיאור הניסויים והתמונות המתקבלות במהלכם מובאים למטה.**


אמבט גלים

שאלות (על התלמידים המתכוננים למבחן בגרות ברמה של 3 יח"ל לענות על השאלות 3,2,1 ו-5).

1. **מחולל גלים יוצר גל שטוח. התמונה המתקבלת מובאת באיור1. קבע את אורך הגל המתפשט באמבט גלים.**
2. **חשב את מהירות ההתקדמות של הגל.**
3. **מכניסים לתוך המים לוחית שעשוייה זכוכית (ראה איור 2).**

א) חשב את מהירות הגל במים רדודים (מעל הלוחית).

ב) קבע את עובי הלוחית.

4. **מהלוחית הנ"ל גוזרים את הצורה המתוארת באיור 4.**

א) מכניסים את הצורה הגזורה לתוך המים. שרטט את מהלך התפשטות הגלים באמבט.

ב) מכניסים את הלוחית (בלי החלק הגזור) לתוך המים. שרטט את מהלך התפשטות הגלים באמבט.

ג) חשב את "מרחק המוקד" של ה"עדשות" שנוצרו.

5. ממקמים מאחורי המחולל מסך עם שני נקבים (ראה איור 3).

א) הסבר את התופעה הנצפית.

ב) קבע מהי תוצאת ההתאבכות בנקודות A ו-B.

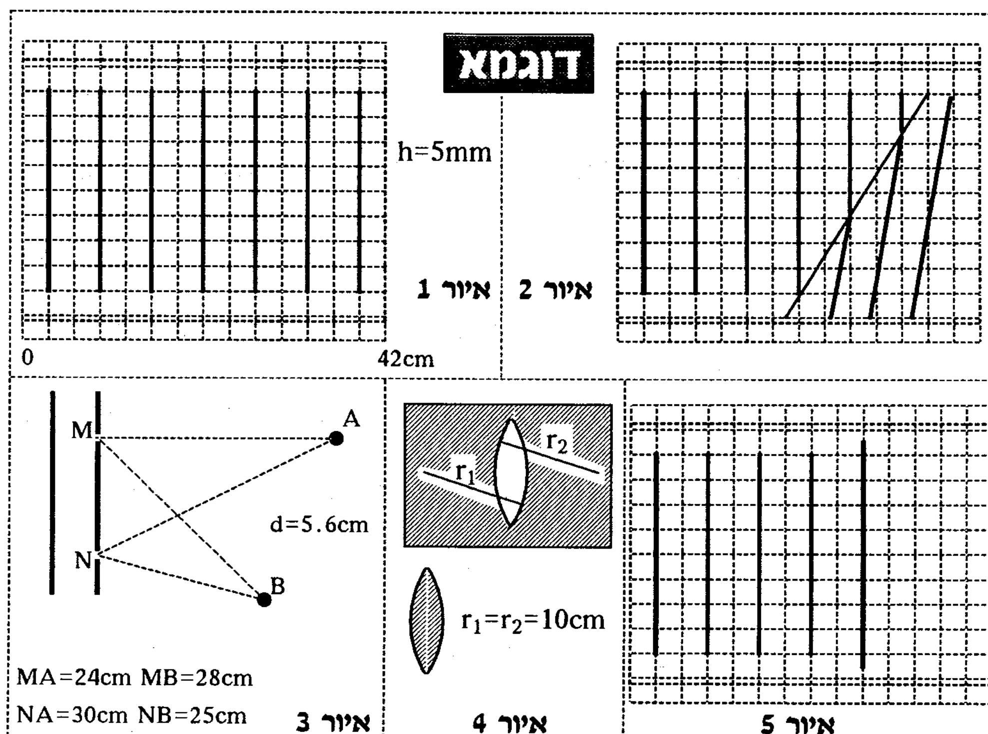
6. מזיזים את המסך למרחק d כלפי מטה לאורך הישר MN.

תאר את השינויים בהתאבכות הגלים המתרחשים בנקודה A.

7. משנים את התדירות של מחולל הגלים, ומכניסים לתוך האמבט מחסום. באמבט מתקבל גל עומד.

א) קבע את אורך הגל העומד.

ב) חשב את התדירות של מחולל הגלים.



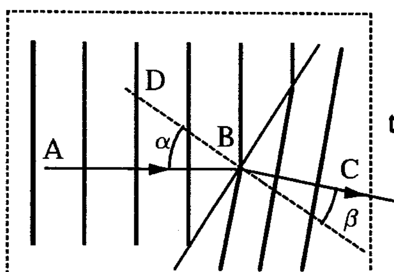
פתרון

1. המרחק בין שתי חזיתות הגל הוא אורך הגל. לכן אורך הגל המבוקש הוא λ=6cm

(המרחק בין שתי חזיתות הגל שווה לשתי משבצות, ואורך המשבצת הוא 3cm).

2. לפי הנוסחה (8), מהירות הגל במים היא:

$$v = \sqrt{gh} = \sqrt{9.8\frac{m}{s^2} \bullet 0.005m} = 0.22\frac{m}{s}$$



3. א) נעביר את קרן הגל הפוגע (AB), קרן הגל הנשבר (BC) ואנך לגבול בין המים ה"עמוקים" והמים ה"רדודים" (DB). נמדוד בעזרת מד זווית את זווית הפגיעה α וזווית השבירה β.

במקרה הנדון תוצאות המדידה הן:

$$\alpha = 33^0 \ , \ \beta = 22^0$$

מהנוסחה (2), מקבלים את המהירות הנדרשת:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v}{v_1} \Rightarrow v_1 = \frac{v \bullet \sin\beta}{\sin\alpha} = \frac{0.22\frac{m}{s} \bullet \sin 22^0}{\sin 33^0} = 0.15\frac{m}{s}$$

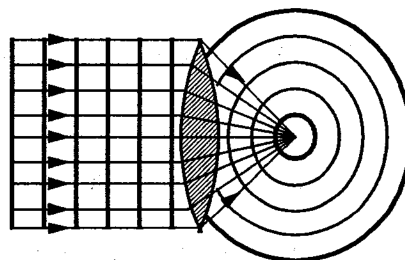
ב) בהתאם לנוסחה (8), גובה המים הרדודים הוא:

$$v_1 = \sqrt{gh_1} \Rightarrow h_1 = \frac{v_1^2}{g} = \frac{(0.15\frac{m}{s})^2}{9.8\frac{m}{s^2}} = 0.0023m = 2.3mm$$

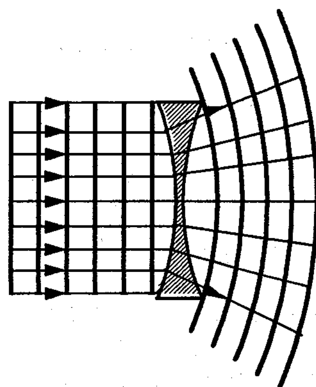
עובי הלוחית הוא:

$$H = h - h_1 = 5mm - 2.3mm = 2.7mm$$

.4 א) מאחר ומהירות הגל מעל הגוף הגזור מהלוחית משתנה, תיווצר סטייה בהתפשטות הגל. התמונה המתקבלת במקרה זה מובאת באיור "א".



איור "א"



איור "ב"

ב) התמונה המתקבלת מובאת באיור "ב".

ג) הגוף הגזור מהלוחית שנמצא בתוך אמבט הגלים מביא לשינוי המהירות של גלי המים, לכן מנוסחה (2) סדרה 7 (עמוד 88) נקבל:

$$\frac{1}{f} = (\frac{v}{v_1}-1)(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}) = (\frac{v-v_1}{v_1})\bullet\frac{2}{r_1} = \frac{0.22\frac{m}{s}-0.15\frac{m}{s}}{0.15\frac{m}{s}}\bullet\frac{2}{0.1m} = 9.33\frac{1}{m}$$

מכאן: $f=0.11m$.

באופן דומה נחשב את מרחק המוקד של ה"עדשה" המפזרת:

$$\frac{1}{f} = (\frac{v_1}{v}-1)(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}) = (\frac{v_1-v}{v})\bullet\frac{2}{r_1} = \frac{0.15\frac{m}{s}-0.22\frac{m}{s}}{0.22\frac{m}{s}}\bullet\frac{2}{0.1m}=-6.36\frac{1}{m}$$

$$f=-0.16m$$

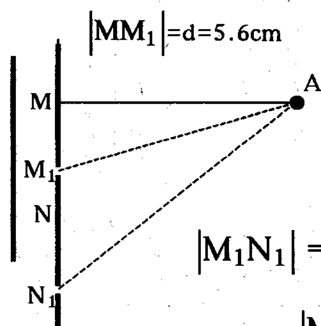
5. א) שני נקבים במסך יוצרים שני מקורות גלים מעגליים חדשים.

מאחר ומקורות אלה נוצרו ממקור אחד, הם קוהרנטיים. לכן במרחב מאחורי המסך נצפה בתופעת התאבכות.

ב) לבדיקת תוצאת ההתאבכות בנקודות A ו-B, נחשב את הפרשי הדרכים לנקודות אלו:

$$\Delta_A= |NA| - |MA| = 6cm,\ \Delta_B = |MB| - |NB| = 3cm$$

הפרש הדרכים עבור נקודה A מכיל מספר שלם של אורכי הגל, והפרש הדרכים עבור נקודה B מכיל מספר אי-זוגי של חצאי אורכי הגל. לכן בנקודה A מתרחשת התאבחות בונה ובנקודה B - התאבכות הורסת.



6. מהשרטוט קובעים, שהמרחקים החדשים של מקורות הגלים מהנקודה A הם:

$$|M_1A| = \sqrt{|MA|^2+d^2} = \sqrt{24^2+5.6^2} = 24.64cm$$

$$|M_1N_1| = |MN| = \sqrt{|NA|^2-|MA|^2} = \sqrt{30^2-24^2} = 18cm$$

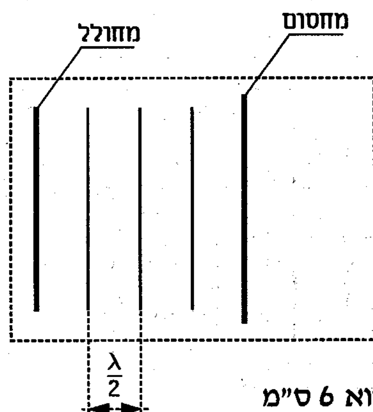
$$|MN_1| = |M_1N_1| + d = 18cm+5.6cm = 23.6cm$$

$$|N_1A| = \sqrt{|N_1M|^2+|MA|^2} = \sqrt{23.6^2+24^2} = 33.65cm$$

הפרש הדרכים עבור נקודה A הוא:

$$\Delta_A = |N_1A| - |M_1A| = 33.65cm - 24.64cm \approx 9cm$$

הפרש הדרכים הנ"ל מכיל מספר אי-זוגי (דהיינו 3) של חצאי הגל ולכן בנקודה A תתרכש התאבכות הורסת.



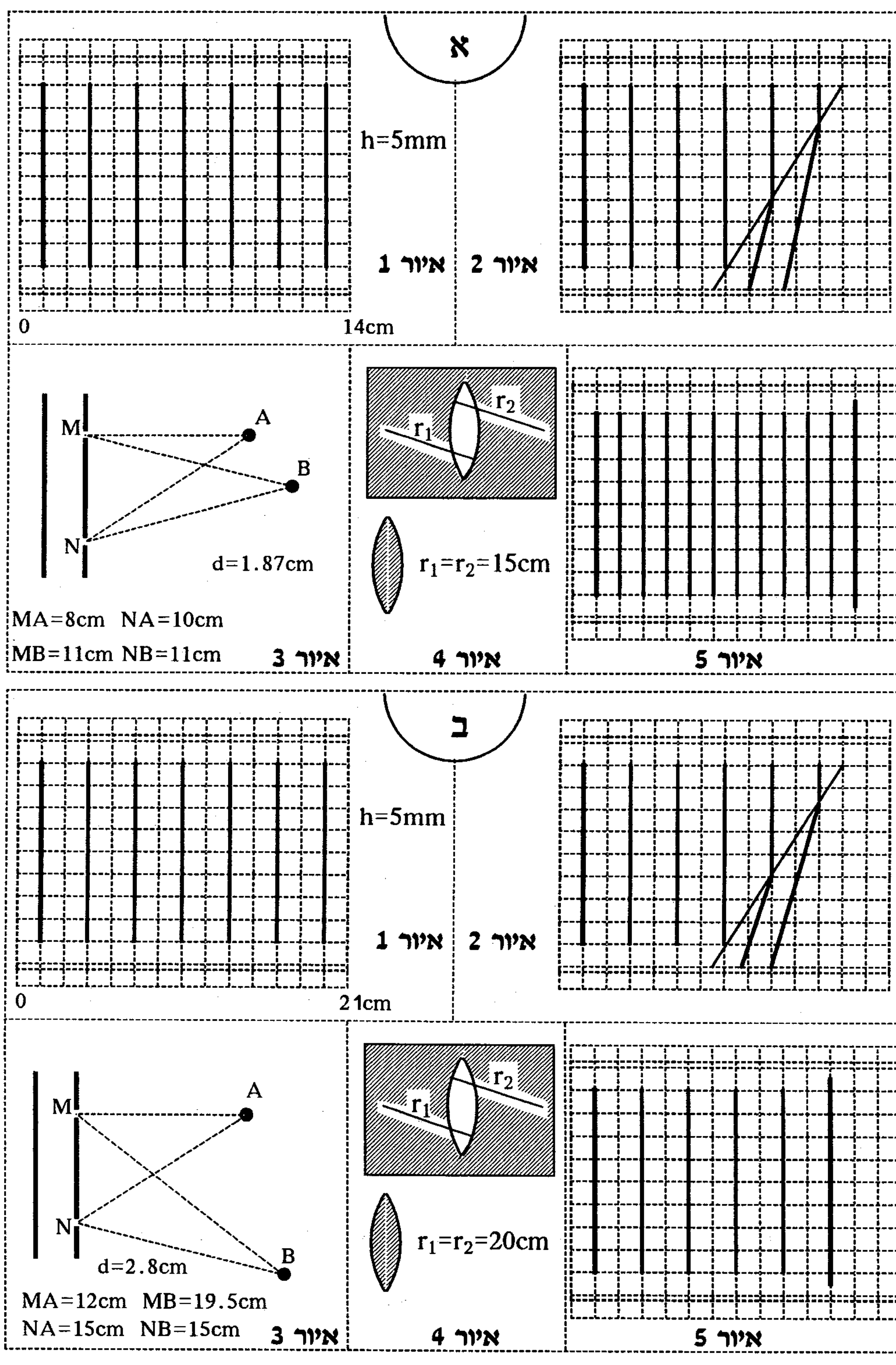
7. **א)** באיור 5 מובא אוסף נקודות של גל עומד בהן האמפליטודה של תנודות חלקיקי המים מקסימלית (נקודות טבור). המרחק בין הנקודות האלו שווה למרחק בין נקודות הצומת, ושווה לאורך הגל העומד. מהאיור קובעים, שמרחק בין נקודות הטבור הסמוכות הוא 6 ס"מ (שתי משבצות) ולכן אורך הגל העומד הוא $\lambda_{\text{גל עומד}}=6cm$.

ב) לפי הנוסחה (6), אורך הגל המתקדם הוא:

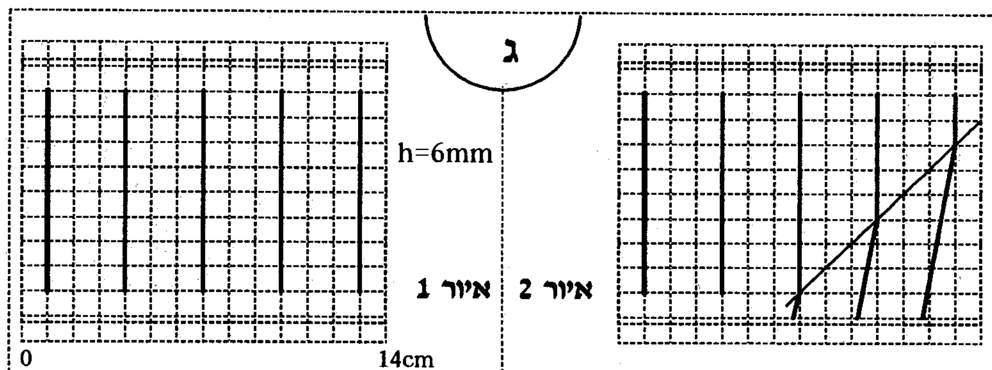
$$\lambda = 2\lambda_{\text{גל עומד}} = 12cm$$

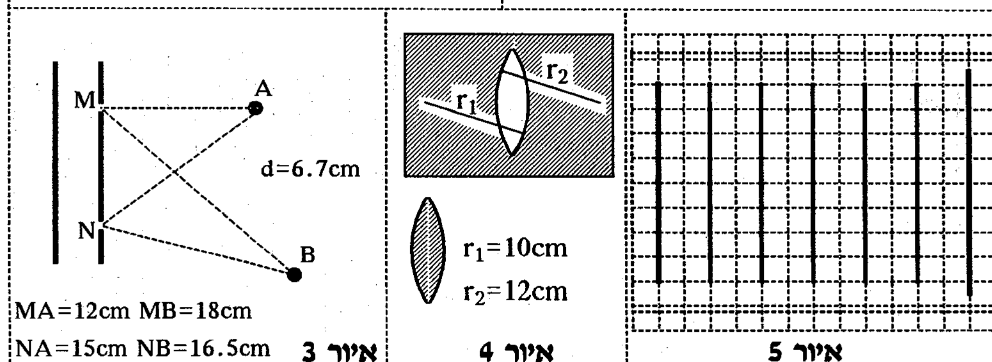
בהתאם לנוסחה (1) מסדרה 11 (עמוד 144), תדירות המבוקשת היא:

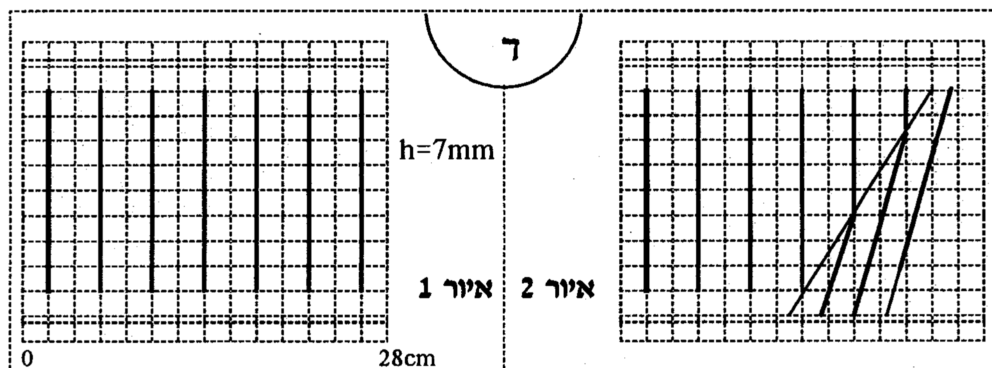
$$f = \frac{\upsilon}{\lambda} = \frac{0.22m/s}{0.12m} = 1.83Hz$$

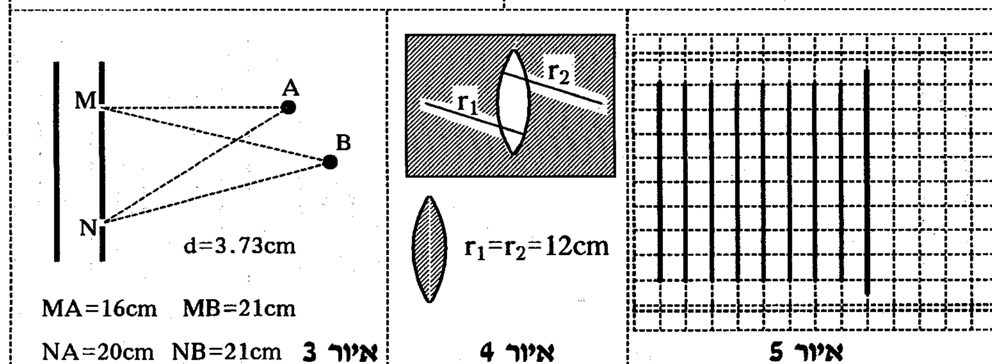


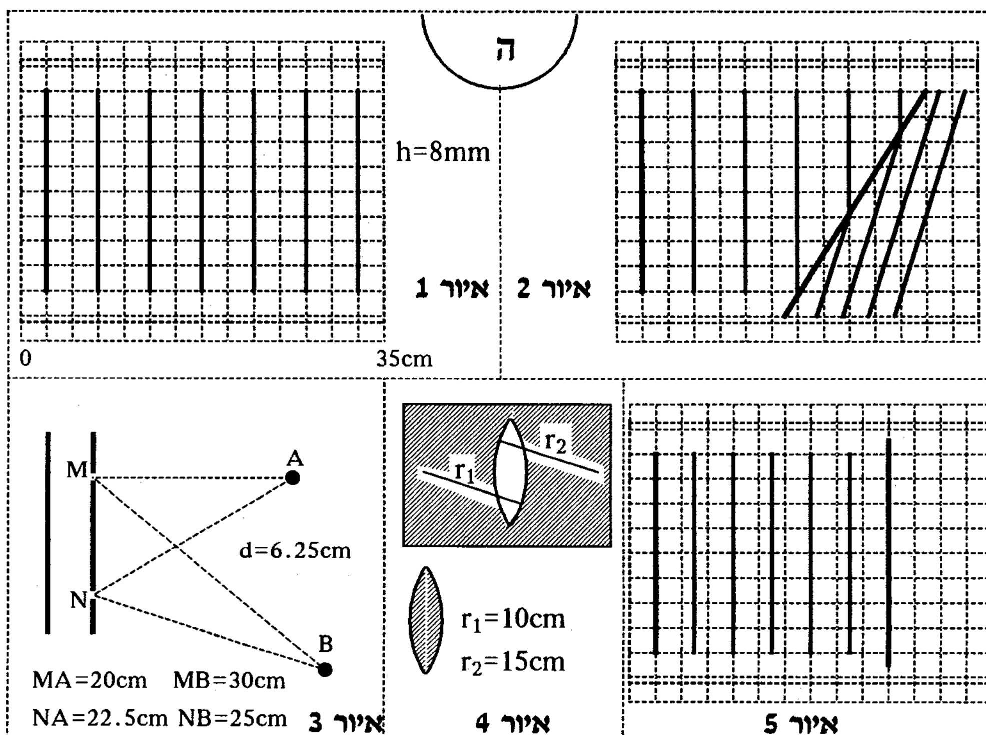
א
h=5mm
איור 1
איור 2
0
14cm
M
N
A
B
d=1.87cm
MA=8cm NA=10cm
MB=11cm NB=11cm
איור 3
r1
r2
r1=r2=15cm
איור 4
איור 5
ב
h=5mm
איור 1
איור 2
0
21cm
M
N
A
B
d=2.8cm
MA=12cm MB=19.5cm
NA=15cm NB=15cm
איור 3
r1
r2
r1=r2=20cm
איור 4
איור 5

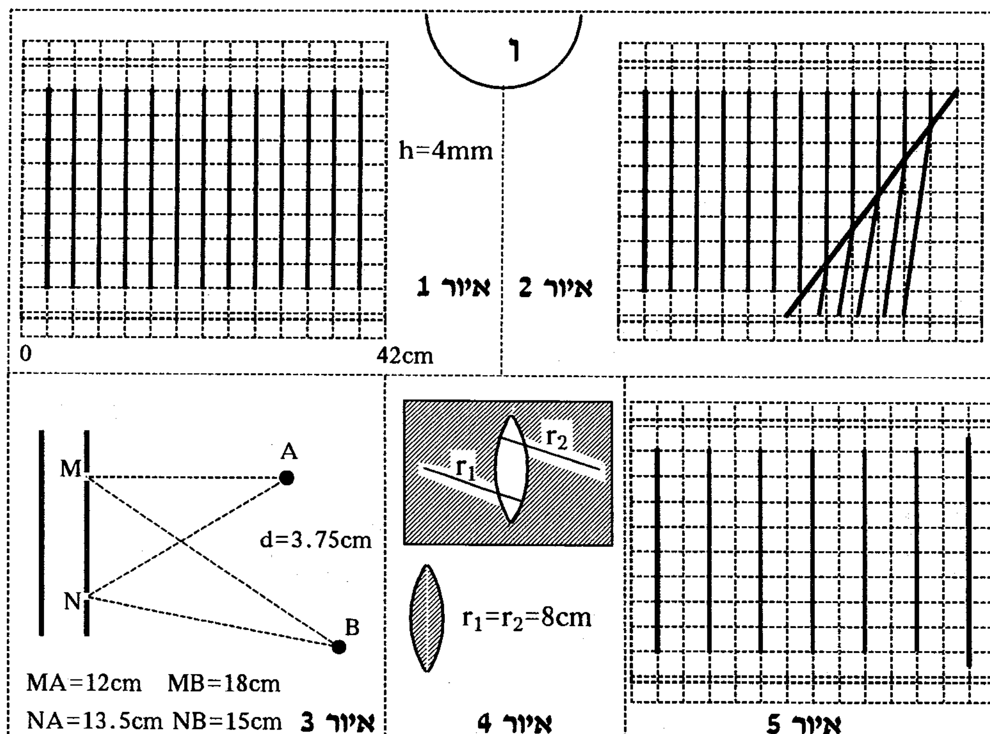

ג
h=6mm
איור 1
איור 2
0
14cm

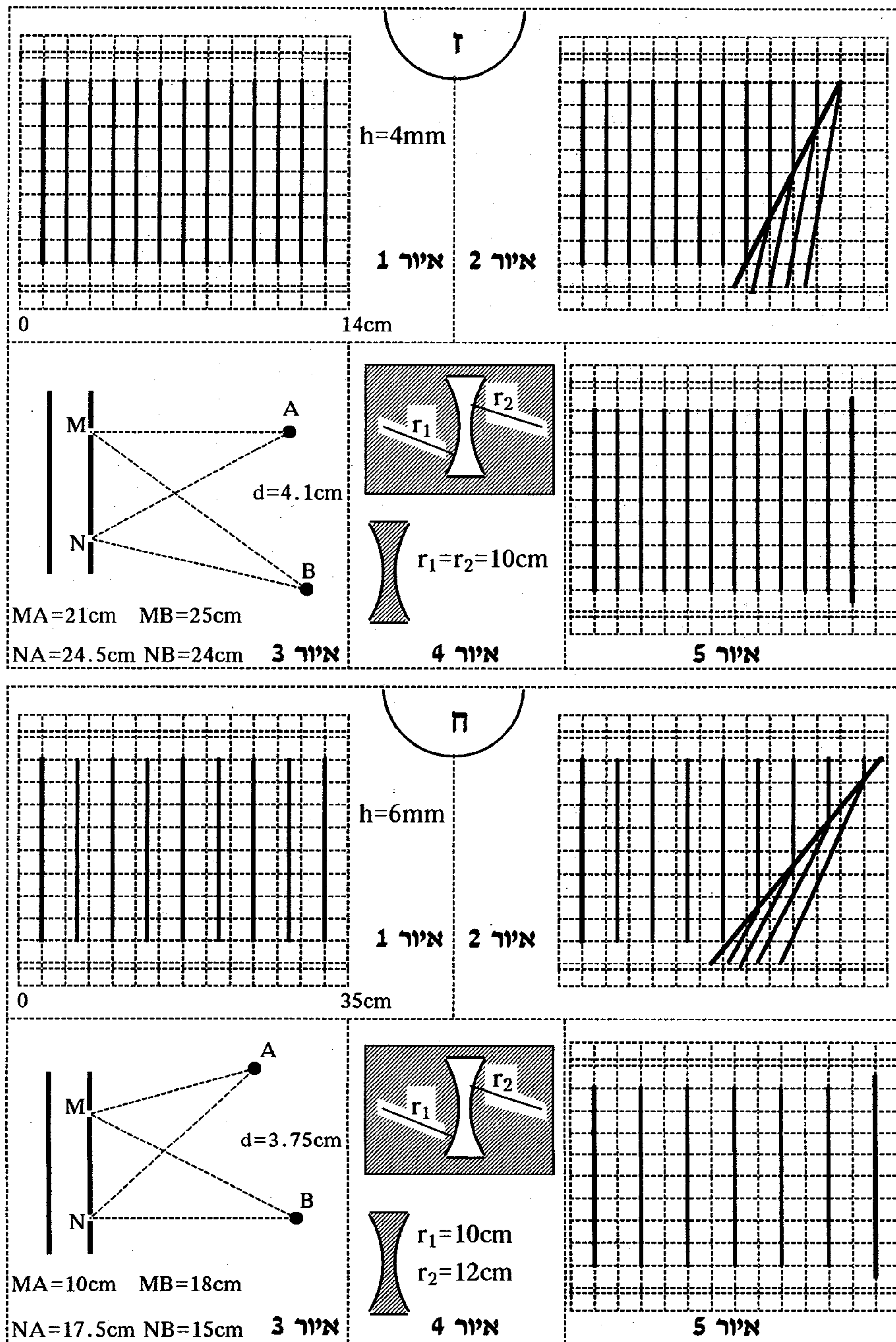

M
A
N
B
d=6.7cm
MA=12cm MB=18cm
NA=15cm NB=16.5cm
איור 3
r1
r2
r1=10cm
r2=12cm
איור 4
איור 5


ד
h=7mm
איור 1
איור 2
0
28cm


M
A
B
N
d=3.73cm
MA=16cm MB=21cm
NA=20cm NB=21cm
איור 3
r1
r2
r1=r2=12cm
איור 4
איור 5


ה
h=8mm
איור 1
איור 2
0
35cm
M
A
N
B
d=6.25cm
MA=20cm MB=30cm
NA=22.5cm NB=25cm
איור 3
r1
r2
r1=10cm
r2=15cm
איור 4
איור 5


ו
h=4mm
איור 1
איור 2
0
42cm
M
A
N
B
d=3.75cm
MA=12cm MB=18cm
NA=13.5cm NB=15cm
איור 3
r1
r2
r1=r2=8cm
איור 4
איור 5


ז
h=4mm
איור 1
איור 2
0
14cm
M
N
A
B
d=4.1cm
MA=21cm MB=25cm
NA=24.5cm NB=24cm
איור 3
r1
r2
r1=r2=10cm
איור 4
איור 5
ח
h=6mm
איור 1
איור 2
0
35cm
A
M
N
B
d=3.75cm
MA=10cm MB=18cm
NA=17.5cm NB=15cm
איור 3
r1
r2
r1=10cm
r2=12cm
איור 4
איור 5

דף תשובות לסדרה "גלים מכניים. תכונות הגלים"

f	λ_1	A	B	A	f_2	f_1	h_1	v_1	v	λ	
Hz	cm				cm	cm	mm	$\frac{m}{sec}$	$\frac{m}{sec}$	cm	
22.1	1	min	max	max	−18.7	11.2	3.2	0.13	0.22	2	א
7.36	3	min	min	max	−21.6	11.6	3.6	0.12	0.22	3	ב
12.1	2	max	min	max	−24.5	19.1	2.4	0.19	0.24	3	ג
13.1	2	min	max	max	−13.0	6.96	5.0	0.14	0.26	4	ד
7.46	3.8	max	max	min	−11.0	5.04	6.3	0.13	0.28	5	ה
3.3	6	max	max	min	−20.6	16.6	1.4	0.16	0.20	3	ו
19.8	1	–	max	min	9.22	−4.2	3.2	0.09	0.20	1	ז
4.84	5	–	–	max	9.27	−3.8	5.0	0.10	0.24	3.8	ח

*13. גלים אלקטרומגנטיים. התאבכות האור

מושגים ונוסחאות עיקריים.

אורך של גל אור בחומר:

λ_0 - אורך של גל אור בריק

n - מקדם השבירה של החומר

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \qquad (1)$$

דרך אופטית של גל אור בחומר:

L - דרך גיאומטרית

n - מקדם השבירה של החומר

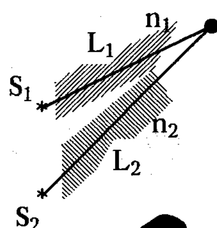
$$L_1 = n \bullet L \qquad (2)$$

הפרש הדרכים האופטי:

L_1, L_2 - הדרכים הגיאומטריות

n_1, n_2 - מקדמי השבירה

$$\Delta = n_2L_2 - n_1L_1 \qquad (3)$$



הפרש הדרכים האופטי בשכבה דקה:

d - עובי השכבה

n - מקדם השבירה

λ - אורך של גל אור

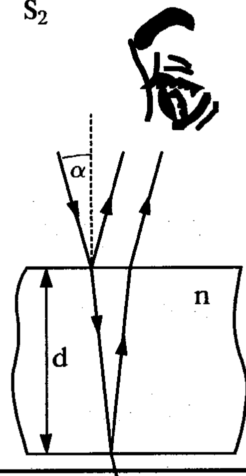
α - זווית הפגיעה

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} + \frac{\lambda}{2} \qquad (4)$$

לאור מוחזר

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} \qquad (5)$$

לאור מועבר



* הסדרה מיועדת לתלמידים המתכוננים למבחן בגרות ברמה של 5 יח"ל

תנאי להתאבכות בונה לשכבה דקה (באור מוחזר):

d - עובי השכבה

n - מקדם השבירה

λ - אורך של גל אור

α - זווית הפגיעה

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2-\sin^2\alpha} = (2k-1)\bullet\frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

תנאי להתאבכות הורסת לשכבה דקה (באור מוחזר):

d - עובי השכבה

n - מקדם השבירה

λ - אורך של גל אור

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2-\sin^2\alpha} = k\bullet\lambda \quad (7)$$

תנאי להתאבכות בונה לשכבה דקה (באור מועבר):

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2-\sin^2\alpha} = k\bullet\lambda \quad (8)$$

תנאי להתאבכות הורסת לשכבה דקה (באור מועבר):

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2-\sin^2\alpha} = (2k-1)\bullet\frac{\lambda}{2} \quad (9)$$

רדיוס טבעות ניוטון:

R - רדיוס העיקום של עדשה

λ - אורך של גל אור

$$r_{\text{בהירה}} = \sqrt{\lambda R(2k+1)\bullet\frac{\lambda}{2}}$$

$$r_{\text{שחורה}} = \sqrt{\lambda R k} \quad (10)$$

בעיה ברשות תלמיד נמצאים מספר מקורות אור מונוכרומטיים (חד צבעיים). לקביעת אורכי הגל של כל אחד מהם, התלמיד מבצע מספר ניסויים. תיאור הניסויים ותוצאותיהם מובאים למטה.

שאלות

1. המערכת מורכבת ממקור אור מונוכרומטי, מראה מישורית וזכוכית מגדלת (ראה איור 1). בנקודה A רואים את הפס השחור הראשון ובנקודה B את הפס השחור ה-k.

   א) שרטט את מהלך הקרניים במערכת.

   ב) הסבר את קיום הפס השחור בנקודה A.

   ג) קבע את אורך הגל של מקור האור.

2. המערכת מורכבת מלוחית עשוייה זכוכית ומעדשה אשר המיקומן מובא באיור 2. רדיוס של הטבעת השחורה מסדר k הוא r.

   א) שרטט את מהלך הקרניים במערכת.

   ב) קבע את אורך הגל של מקור האור.

3. ממלאים את המרחב בין הלוחית והעדשה בנוזל מסויים. כתוצאה מכך, רדיוס של הטבעת השחורה מסדר k קטן פי m.

קבע את מקדם השבירה של הנוזל.

4. מקור אור מונוכרומטי מאיר על הלוחית שעשוייה זכוכית בעלת עובי d.

א) בזווית הפגיעה השווה ל-0^0**, הלוחית נראת ציבעונית. אם משנים את זווית הפגיעה ל-**α**, הלוחית נראת שחורה (בפעם הראשונה). קבע את אורך הגל המונוכרומטי.**

ב) קבע את העובי המינימלי הנדרש d_{min} **של הזכוכית עבורו הלוחית נראת צבעונית באור מוחזר.**

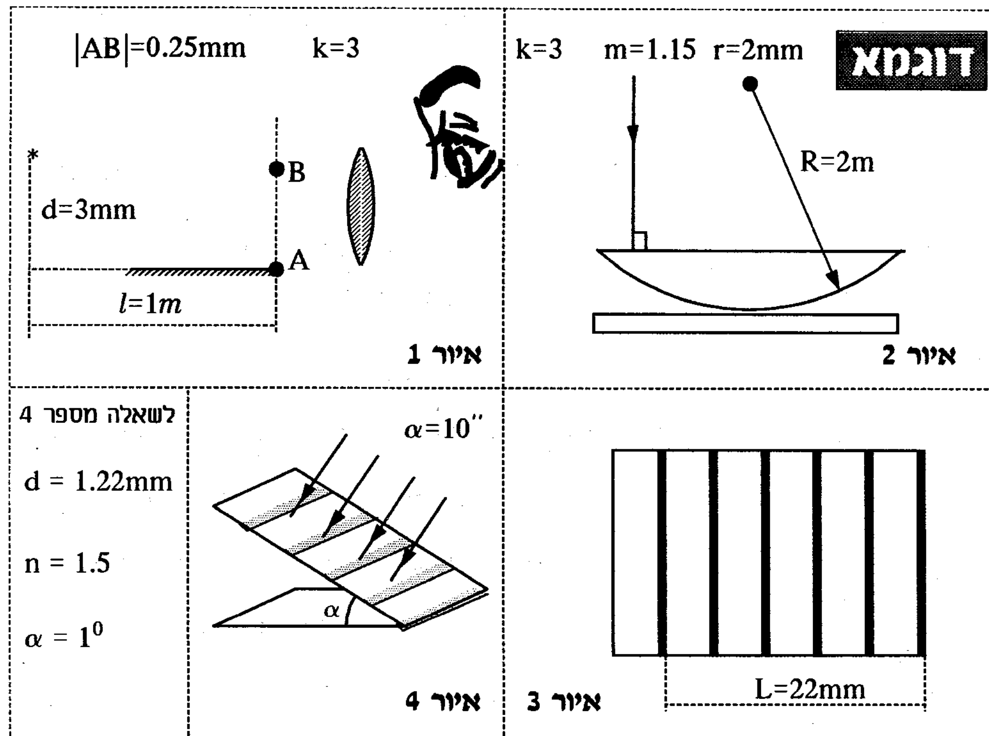
ג) קבע את העובי המינימלי הנדרש d_{min} **של הזכוכית עבורו הלוחית נראת צבעונית באור מועבר.**

5. המערכת מורכבת משתי לוחיות דקות שעשויות זכוכית (ראה איור 3). אור פוגע לאורך הנורמל (מאונך לדופן) בלוחית העליונה. התמונה המתקבלת מובאת באיור 4.

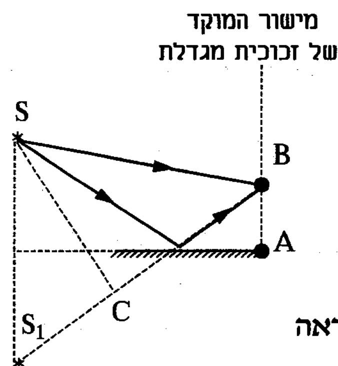
א) הסבר את התמונה המתקבלת.

ב) קבע את אורך הגל המונוכרומטי המאיר את המערכת.

דוגמא



פתרון



1. א) במערכת שבאיור האור מגיע לנקודה הנמצאת במישור המוקד של זכוכית מגדלת, בשתי דרכים: ישירות מהמקור ולאחר החזרה מהמראה. גלי האור המגיעים ישירות מהמקור וגם אלו לאחר השתקפות במראה הם קוהרנטיים. לכן במישור המוקד של זכוכית מגדלת נצפית תופעת ההתאבכות.

ב) מרחקי הנקודה A משני המקורות S ו-S_1 שווים. מכאן הפרש הדרכים הגיאומטרי הוא 0. בזמן החזרת האור מהמראה, נוצר הפרש מופע של 180^0 המתאים להפרש הדרכים של חצי אורך הגל. כתוצאה מכך, בנקודה A מתרחשת התאבכות הורסת, ונצפה פס שחור.

ג) בהתאם לנוסחה (7), התנאי להתאבכות הורסת באור מוחזר בנקודה B הוא:

$$\Delta = |S_1C| = k\lambda$$

משיקולים גיאומטריים ומהנחה שהזוויות קטנות, נקבל:

$$\frac{|AB|}{l} = \frac{|S_1C|}{|SS_1|} \Rightarrow \lambda = \frac{|AB|\bullet 2d}{kl} = \frac{2.5\bullet 10^{-4}m\bullet 2\bullet 3\bullet 10^{-3}m}{3\bullet 1m} = 5\bullet 10^{-7}m$$

2. א) קרן אור 1 הפוגעת בעדשה, מתפצלת לשתי קרניים $1''$ ו-$1'$,

מה שמביא לתופעת התאבכות (ראה איור).

תוצאת ההתאבכות תלויה בהפרש הדרכים

של שתי הקרניים הנ"ל.

ב) הפרש הדרכים בין שתי הקרניים הוא:

$$\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2}$$

משיקולים גיאומטריים נובע:

$$|CB|^2 = R^2 - (R-h)^2 \Rightarrow r^2 = 2Rh - h^2$$

מאחר ו- $h \ll R$, נקבל: $h = \frac{r^2}{2R}$. נציב את הביטוי האחרון בביטוי עבור Δ

ונקבל:

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

טבעת שחורה (התאבכות הורסת) מתקבלת כאשר הפרש הדרכים מכיל מספר

אי-זוגי של חצאי הגל, לכן:

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\bullet\frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{r^2}{kR} = \frac{(2\bullet 10^{-3}m)^2}{3\bullet 2m} = 6.67\bullet 10^{-7}m$$

3. מילוי המרחב בין העדשה לבין הלוחית בנוזל עבורו מקדם השבירה הוא n, משנה את הפרש הדרכים האופטי. בהתאם לנוסחה (2) ההפרש הזה הוא:

$$\Delta = 2hn + \frac{\lambda}{2} = \frac{r_1^2}{R} \bullet n + \frac{\lambda}{2}$$

מהשיוויון האחרון נובע:

$$r_1 = \sqrt{\frac{kR\lambda}{n}} = \frac{r}{\sqrt{n}} \Longrightarrow n = (\frac{r}{r_1})^2 = m^2 = (1.15)^2 = 1.32$$

4. א) במצב בו הלוחית נראת צבעונית מתרחשת התופעה של התאבכות בונה. שינוי בזווית הפגיעה גורם לשינוי בהפרש הדרכים ולשינוי בתוצאת ההתאבכות.

במצב בו לוחית נראת שחורה, מתרחשת התאבכות הורסת. הפרש הדרכים בשני המצבים שונה בחצי אורך הגל. נעזר בנוסחה (4) ונרשום:

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \frac{\lambda}{2} \Longrightarrow (2dn + \frac{\lambda}{2}) - (2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} + \frac{\lambda}{2}) = 2d(n - \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}) = \frac{\lambda}{2}$$

מהשיוויון לעיל נובע, שאורך הגל המבוקש הוא:

$$\lambda = 4d(n - \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}) = 4.87 \bullet 10^{-7} m$$

ב) התנאי להתאבכות בונה באור מוחזר הוא:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} = (2k-1) \bullet \frac{\lambda}{2}$$

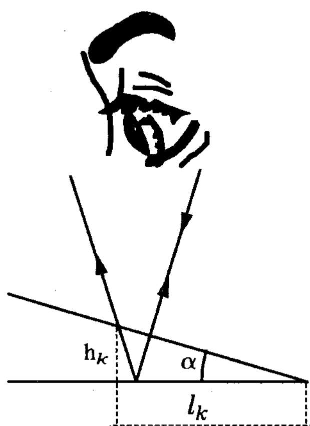
נציב $\alpha=0$ ו-$k=1$ (הרי מדובר בעובי מינימלי) ונקבל:

$$2d_{min}n = \frac{\lambda}{2} \Longrightarrow d_{min} = \frac{\lambda}{4n} = \frac{4.87 \bullet 10^{-7} m}{4 \bullet 1.5} = 8.1 \bullet 10^{-8} m$$

ג) התנאי להתאבכות הורסת באור מועבר (נוסחה (9)) גורר:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} = k \bullet \lambda \Longrightarrow d_{min} = \frac{\lambda}{2n} = \frac{4.87 \bullet 10^{-7} m}{2 \bullet 1.5} = 1.6 \bullet 10^{-7} m$$

5. א) האור הפוגע בלוחית העליונה של המערכת מתפצל לשתי קרניים (ראה איור). בין שתי הקרניים הנ"ל נוצר הפרש דרכים, שמביא לתופעת ההתאבכות.



ב) נרשום את התנאי להתאבכות הורסת מסדר k עבור מקרה הנדון:

$$\Delta \approx 2h_k = k\lambda$$

מרחק פס השחור מהנקודה A הוא:

$$l_k = \frac{h_k}{\tan\alpha} \approx \frac{h_k}{\alpha}$$

מרחק בין הפסים הסמוכים הוא:

$$\Delta l = l_{k+1} - l_k = \frac{h_{k+1}}{\alpha} - \frac{h_k}{\alpha} = \frac{(k+1)\lambda}{2\alpha} - \frac{k\lambda}{2\alpha} = \frac{\lambda}{2\alpha}$$

מהשיוויון האחרון נובע, שאורך הגל המבוקש הוא:

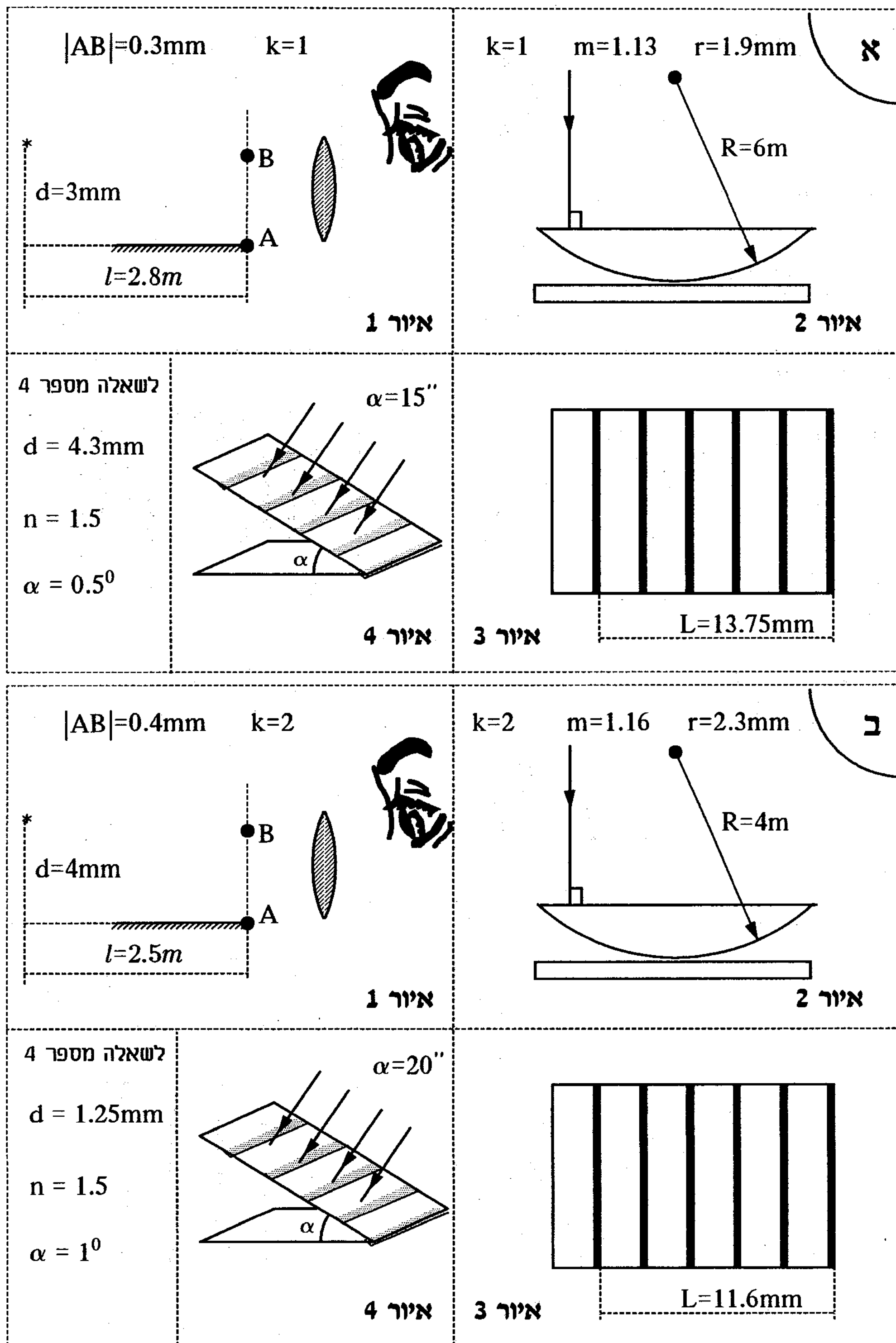
$$\lambda = 2\bullet\alpha\bullet\Delta l$$

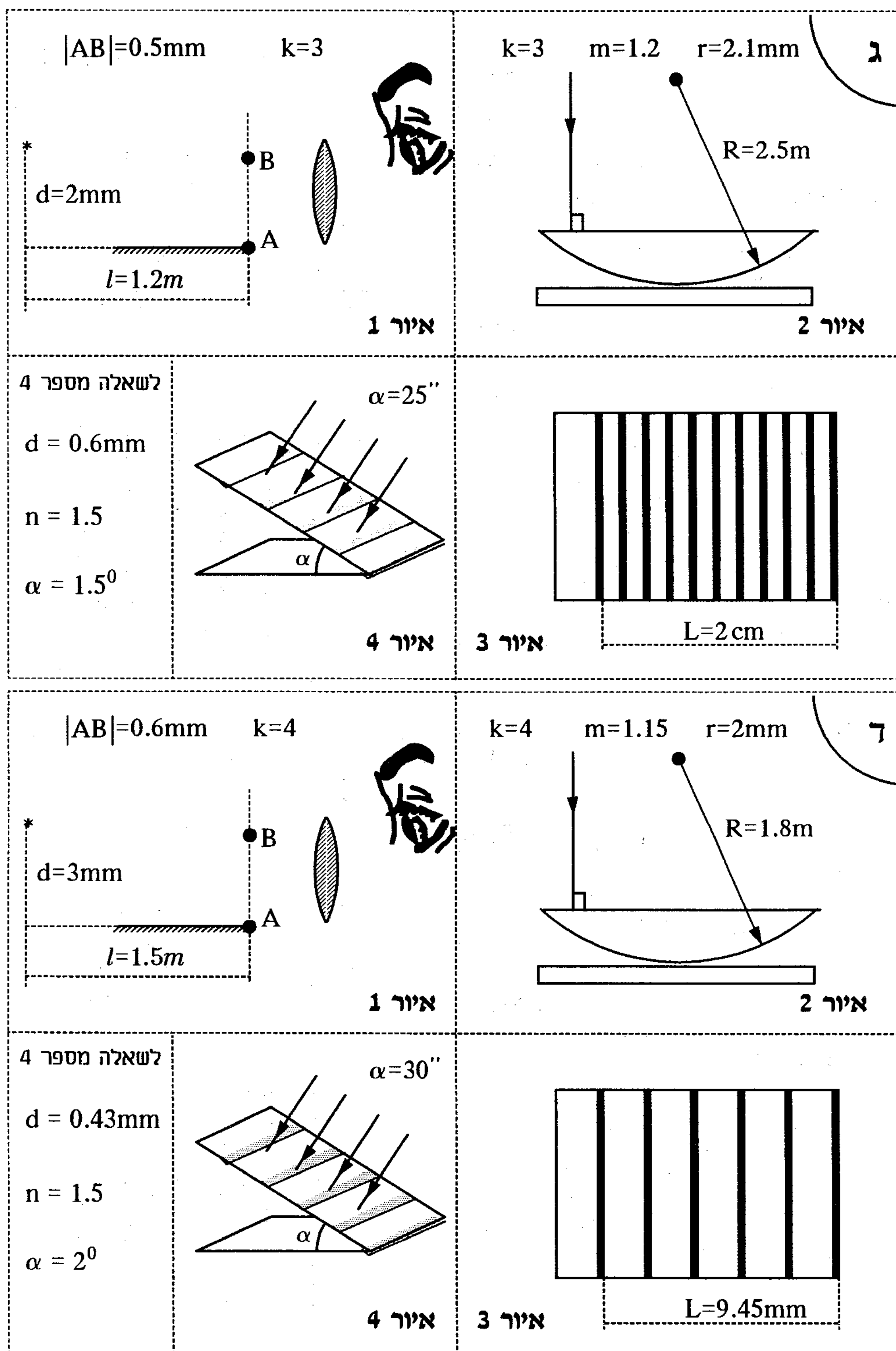
מאיור 4 קובעים, שהמרחק בין הפסים הוא:

$$\Delta l = \frac{22mm}{5} = 4.4mm$$

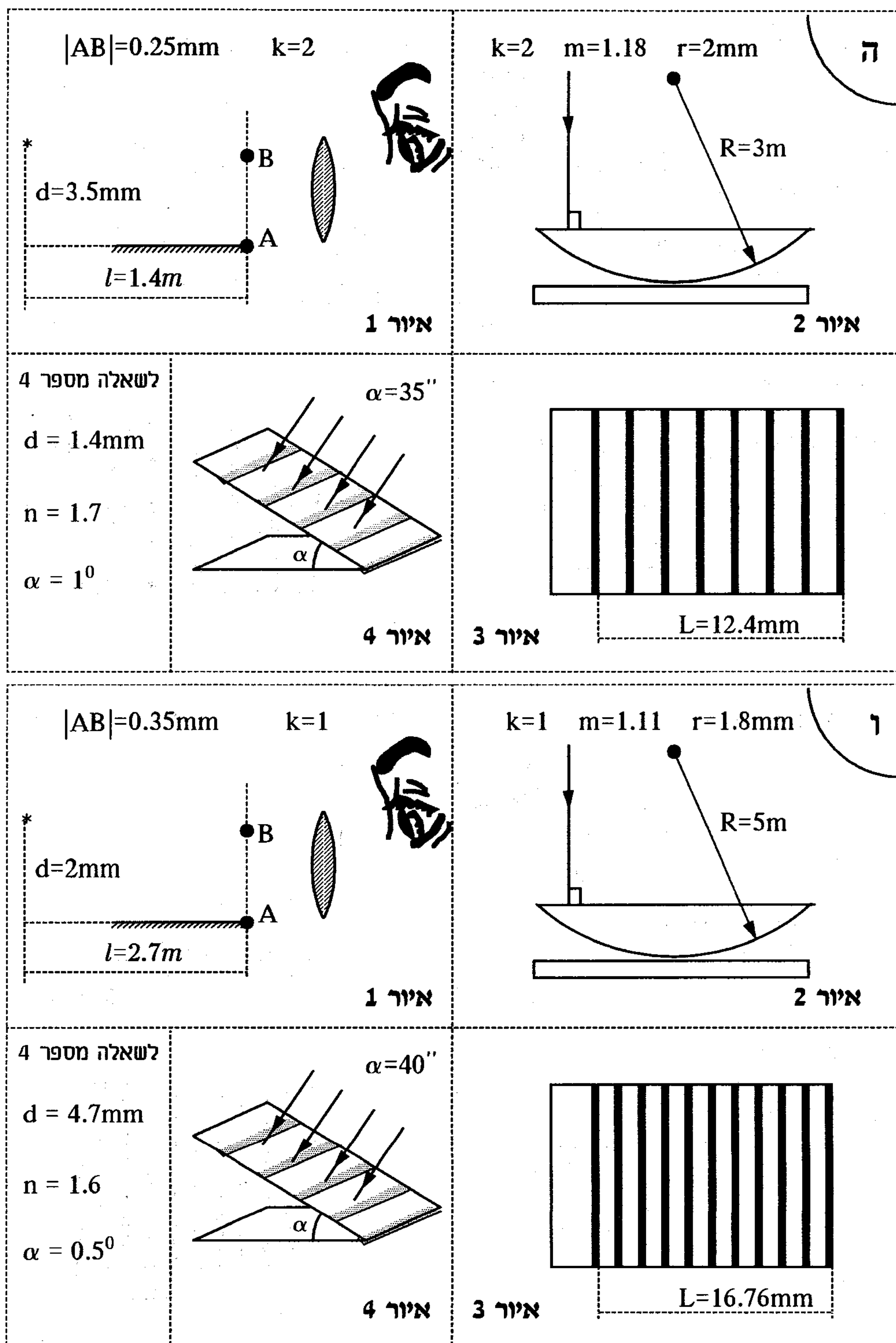
נציב את הערך עבור Δl בביטוי עבור λ ונקבל:

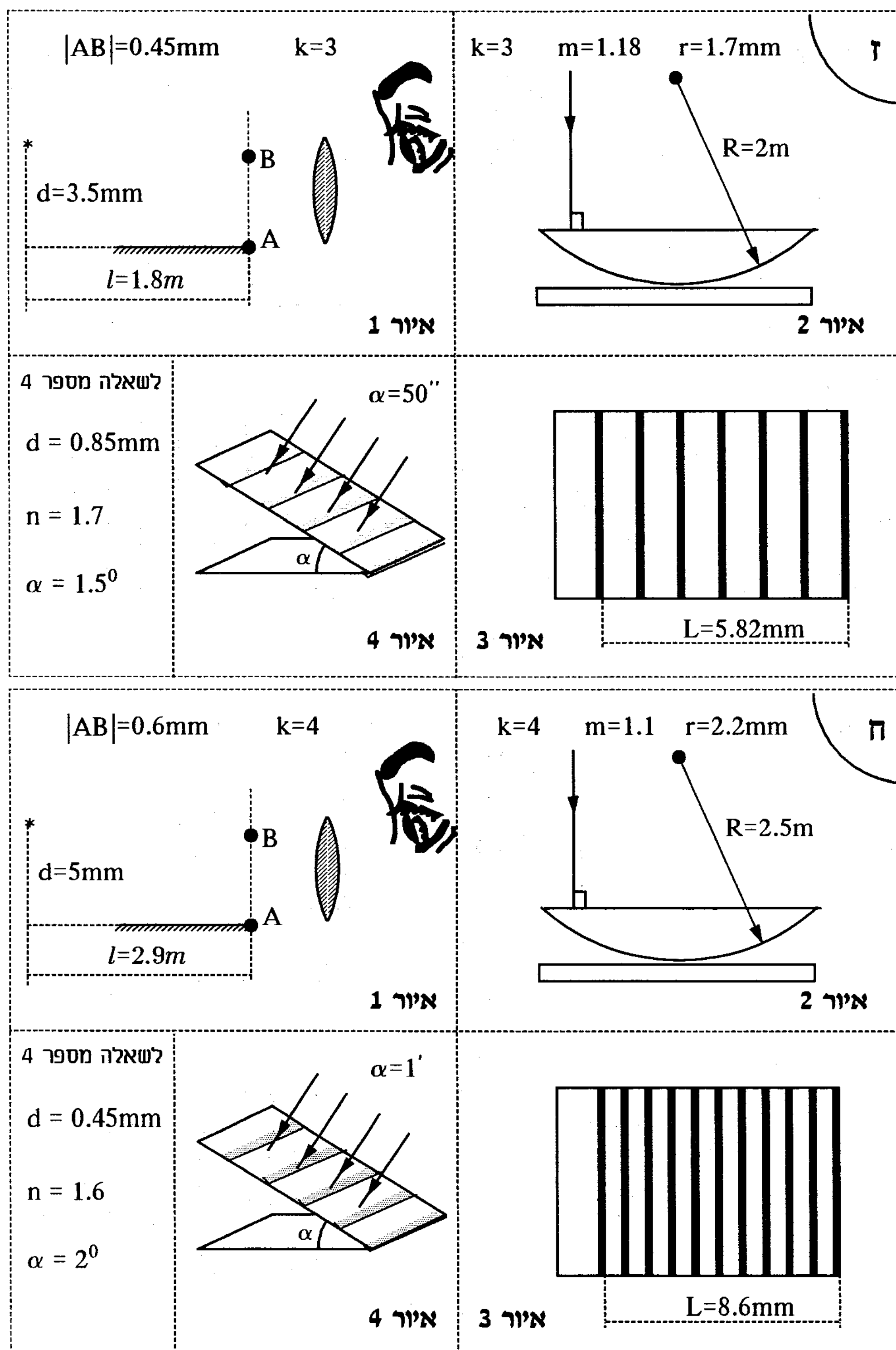
$$\lambda = 2\bullet 4.85\bullet 10^{-5}rad\bullet 4.4\bullet 10^{-3}m = 4.27\bullet 10^{-7}m$$


א
|AB|=0.3mm k=1
d=3mm
l=2.8m
B
A
איור 1
k=1 m=1.13 r=1.9mm
R=6m
איור 2
לשאלה מספר 4
d = 4.3mm
n = 1.5
α = 0.5⁰
α=15"
α
איור 4
איור 3
L=13.75mm
ב
|AB|=0.4mm k=2
d=4mm
l=2.5m
B
A
איור 1
k=2 m=1.16 r=2.3mm
R=4m
איור 2
לשאלה מספר 4
d = 1.25mm
n = 1.5
α = 1⁰
α=20"
α
איור 4
איור 3
L=11.6mm



|AB|=0.5mm k=3
d=2mm
B
A
l=1.2m
איור 1
k=3 m=1.2 r=2.1mm
ג
R=2.5m
איור 2
לשאלה מספר 4
d = 0.6mm
n = 1.5
α = 1.5⁰
α=25''
α
איור 4
איור 3
L=2cm
|AB|=0.6mm k=4
d=3mm
B
A
l=1.5m
איור 1
k=4 m=1.15 r=2mm
ד
R=1.8m
איור 2
לשאלה מספר 4
d = 0.43mm
n = 1.5
α = 2⁰
α=30''
α
איור 4
איור 3
L=9.45mm


ה
k=2 m=1.18 r=2mm
R=3m
איור 2
|AB|=0.25mm k=2
B
d=3.5mm
A
l=1.4m
איור 1
α=35"
לשאלה מספר 4
d = 1.4mm
n = 1.7
α = 1⁰
α
איור 4
איור 3
L=12.4mm
ו
k=1 m=1.11 r=1.8mm
R=5m
איור 2
|AB|=0.35mm k=1
B
d=2mm
A
l=2.7m
איור 1
α=40"
לשאלה מספר 4
d = 4.7mm
n = 1.6
α = 0.5⁰
α
איור 4
איור 3
L=16.76mm


ז
|AB|=0.45mm
k=3
d=3.5mm
B
A
l=1.8m
איור 1
k=3
m=1.18
r=1.7mm
R=2m
איור 2
לשאלה מספר 4
d = 0.85mm
n = 1.7
α = 1.5⁰
α=50″
α
איור 4
איור 3
L=5.82mm
ח
|AB|=0.6mm
k=4
d=5mm
B
A
l=2.9m
איור 1
k=4
m=1.1
r=2.2mm
R=2.5m
איור 2
לשאלה מספר 4
d = 0.45mm
n = 1.6
α = 2⁰
α=1′
α
איור 4
איור 3
L=8.6mm

דף תשובות לסדרה "גלים אלקטרומגנטיים. התאבכות האור"

	שאלה 1	שאלה 2	שאלה 3	שאלה 4א	שאלה 4ב	שאלה 4ג	שאלה 5
	λ	λ	n	λ	d_{min}	d_{min}	λ
	nm	nm		nm	nm	nm	nm
א	643	602	1.28	437	72.8	145.6	400
ב	640	661	1.35	508	84.7	169.3	450
ג	555	588	1.44	548	91.3	182.7	485
ד	600	555	1.32	698	116.3	232.7	550
ה	625	667	1.39	502	73.8	147.6	600
ו	518	648	1.23	447	69.8	139.7	650
ז	583	482	1.39	685	100.7	201.5	470
ח	517	484	1.21	685	107.0	214	500

14. גלים אלקטרומגנטיים. עקיפת האור.

מושגים ונוסחאות עיקריים.

עקיפת האור [diffraction] - סטיית האור מהתפשטותו לפי קו ישר, עקיפת מכשולים והחדרתו לתחום של הצל הגיאומטרי.

עיקרון הויגנס-פרנל [Huygens–Fresnel]:

כל המקורות המשניים, הנמצאים בחזית הגל, קוהרנטיים. אמפליטודה ומופע של גל בנקודה כלשהי במרחב מתקבלים כתוצאה של ההתאבכות גלים, הנוצרים על ידי מקורות משניים.

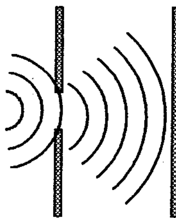
עקיפת פרנל (תנאי לצפייה):

L - מרחק הסדק מנקודת הצפייה

a - רוחב הסדק

λ - אורך הגל

$$L \approx \frac{a^2}{\lambda} \quad (1)$$



עקיפת פרנל

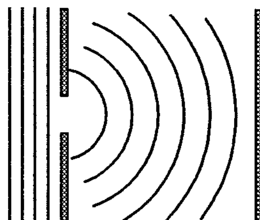
עקיפת פראונהופר (תנאי לצפייה):

L - מרחק הסדק מנקודת הצפייה

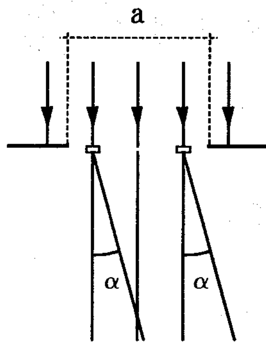
a - רוחב הסדק

λ - אורך הגל

$$L \gg \frac{a^2}{\lambda} \quad (2)$$



עקיפת פראונהופר



עקיפת פראונהופר בסדק מלבני (התנאי לקבלת מינימום אור):

α - הזווית בה מתקבל המינימום

a - רוחב הסדק

k -המספר הסידורי של המינימום

λ - אורך הגל

$$\alpha \approx \frac{k\lambda}{a} \qquad (3)$$

עקיפת פראונהופר בסדק מלבני (התנאי לקבלת מקסימום אור):

α - הזווית בה מתקבל המקסימום

a - רוחב הסדק

k -המספר הסידורי של המקסימום

λ - אורך הגל

$$\alpha \approx \frac{(2k+1)\lambda}{2a} \qquad (4)$$

הערך הזוויתי של פס האור המרכזי:

λ - אורך הגל

a - רוחב הסדק

$$\alpha_0 \approx \frac{2\lambda}{a} \qquad (5)$$

ערך הזוויתי של פס אור:

λ - אורך הגל

a - רוחב הסדק

$$\alpha \approx \frac{\lambda}{a} \qquad (6)$$

עקיפת פראונהופר בסדק מעגלי (תנאי לקבלת המינימום הראשון של האור):

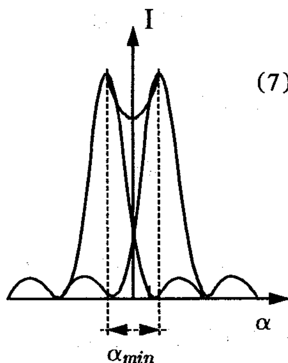
α - הזווית בה מתקבל המינימום

d - קוטר הסדק

λ -אורך הגל

$$\alpha \approx \frac{1.2\lambda}{d} \qquad (7)$$

כושר הפרדה (קריטריון רילי [Raylegh]):



d - קוטר הסדק

λ -אורך הגל

$$\alpha_{min} \approx \frac{1.2\lambda}{d} \qquad (8)$$

בעיה **סדק מלבני יחיד, שרוחבו a ואורכו b ($b \gg a$), מוקרן באור מונוכרומטי, שאורך הגל שלו λ. תמונת העקיפה מתקבלת על המסך הנמצא במרחק L ($L \gg \frac{a^2}{\lambda}$) מהסדק (ראה איור 1). באיור 2 מובא גרף התלות של אינטנסיביות האור I בזווית α.**

שאלות (על התלמידים המתכוננים למבחן בגרות ברמה של 3 יח"ל לענות על השאלה 6 בלבד).

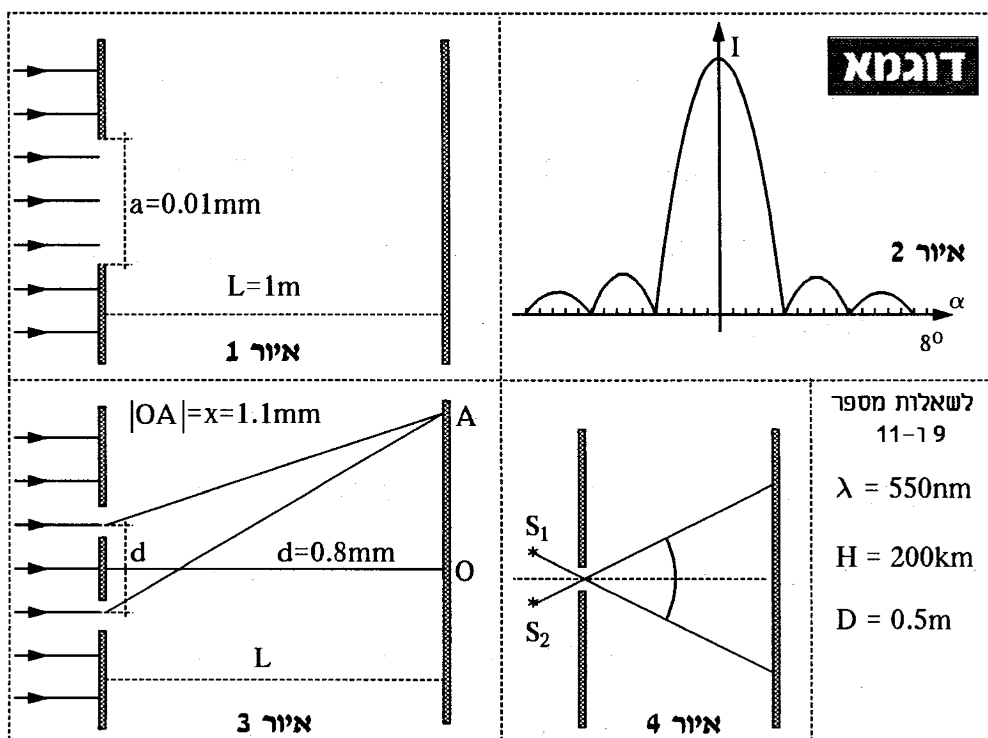
1. **קבע את אורך גל האור, המוקרן אל הסדק.**
2. **קבע את הערך הזוויתי של המקסימום המרכזי.**
3. **חשב את הרוחב של פס האור המרכזי.**
4. **חשב את הזווית לנקודת המקסימום הראשון.**
5. **חשב את המרחק ממרכז המסך למקסימום הראשון.**
6. **מוסיפים סדק זהה לסדק הנתון במרחק d ממנו (ניסוי ינג). בנקודה A הנמצאת במרחק x ממרכז המסך (ראה איור 3) מתקבל מקסימום מסדר k.קבע את סדר המקסימום המתקבל.**
7. **מחליפים את הסדק המלבני בסדק מעגלי שקוטרו a. חשב את הערך הזוויתי ואת הקוטר של הטבעת השחורה הראשונה.**

8. ממקמים לפני הסדק המעגלי שני מקורות אור נקודתיים. מהו המרחק הזוויתי המינימלי בין שני המקורות עבורו עוד ניתן לראות את שני המקורות בנפרד (ראה איור 4).

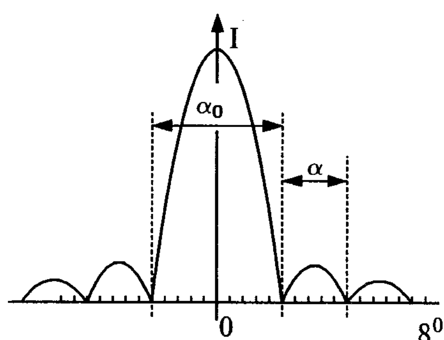
9. אמוד את כושר ההפרדה של העין לאור שאורך הגל שלו הוא λ **(קוטר האישון** $d = 2mm$).

10. חשב את הזווית המקסימלית בין שתי לוחיות שבמערכת המתוארת בשאלה 5 מסדרה 13, עבורה עוד ניתן להפריד בין שני הפסים (מרחק הראיה הקרובה הוא $L_0=25cm$).

11. אמוד את מידות הגוף הנמצא על פני כדור הארץ, שניתן לצלמו מלווין הנמצא בגובה H **מעל כדור הארץ. הקוטר של עדשת המצלמה הוא** D.



פתרון



1. מהגרף קובעים, שהמרחק הזוויתי בין שתי

נקודות מינימום הוא: $\alpha = \frac{8^0}{16} \bullet 5 = 2.5^0$.

נציב את הערך עבור α (ברדיאנים)

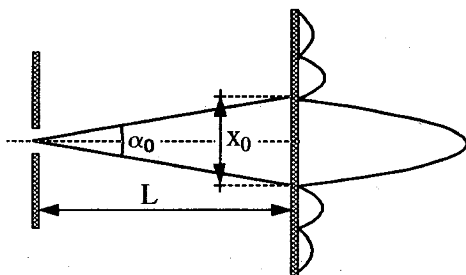
בנוסחה (6) ונקבל עבור אורך הגל:

$$\lambda = a \bullet \alpha = 1 \bullet 10^{-5}m \bullet 0.0436 = 4.36 \bullet 10^{-7}m$$

2. בהתאם לנוסחה (5), הערך הזוויתי של פס האור המרכזי הוא:

$$\alpha_0 = \frac{2\lambda}{a} = 2\alpha = 2 \bullet 2.5^0 = 5^0$$

3. משיקולים גיאומטריים נובע:

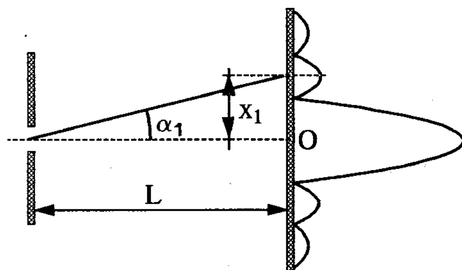


$$x_0 = 2L \bullet \tan\frac{\alpha_0}{2}$$

מאחר והזוויות קטנות, נקבל:

$$x_0 = 2L \bullet \tan\frac{\alpha_0}{2} \approx 2L \bullet \frac{\alpha_0}{2} = 0.087m$$

4. בהתאם לנוסחה (4), התנאי לקבלת המקסימום הראשון יירשם באופן הבא:



$$\alpha_1 = \frac{(2k+1)\lambda}{2a} = \frac{3\lambda}{2a}$$

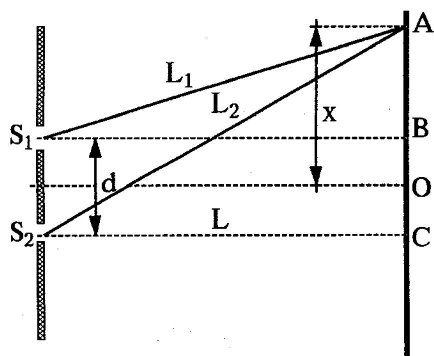
מכאן:

$$\alpha_1 = \frac{3 \bullet 4.36 \bullet 10^{-7}m}{2 \bullet 1 \bullet 10^{-5}m} = 0.0654\,rad$$

5. מהשרטוט קובעים, שמרחק מרכז המסך O מהמקסימום הראשון הוא:

$$x_1 = L \bullet \tan\alpha_1 \approx L \bullet \alpha_1 = 1m \bullet 0.0654 = 0.0654m$$

6. בניסוי יַנג שני סדקים S_1 ו- S_2 מהווים שני מקורות אור קוהרנטיים. אינטנסיביות האור בנקודה תלוייה בהפרש הדרכים בין הסדקים לבין הנקודה. נקבע את הפרש הדרכים עבור נקודה A.



מהמשולש S_1BA מקבלים:

$$L_1^2 = L^2 + (x-\frac{d}{2})^2$$

מהמשולש S_2CA מקבלים:

$$L_2^2 = L^2 + (x+\frac{d}{2})^2$$

שני השיוויונות האחרונים גוררים:

$$L_2^2 - L_1^2 = 2xd \implies (L_2-L_1)(L_2+L_1) = 2xd$$

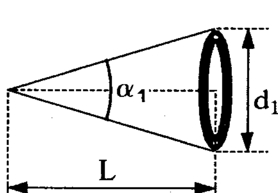
ניתן להניח ש - $L_1+L_2 \approx 2L$. בהנחה זו נקבל את הביטוי עבור הפרש הדרכים:

$$\Delta = L_2-L_1 = \frac{xd}{L}$$

בנקודה A מתקבל מקסימום מסדר k, ז"א הפרש הדרכים מכיל מספר שלם k של אורכי הגל: $\Delta = k\lambda$. משני השיוויונות האחרונים מקבלים שסדר המקסימום המבוקש הוא:

$$k = \frac{xd}{L\lambda} = \frac{1.1 \bullet 10^{-3}m \bullet 8 \bullet 10^{-4}m}{1m \bullet 4.36 \bullet 10^{-7}m} = 2$$

7. בהתאם לנוסחה (7), הערך הזוויתי של הטבעת השחורה הראשונה הוא:



$$\alpha_2 = \frac{1.2 \bullet \lambda}{d} = \frac{1.2 \bullet 4.36 \bullet 10^{-7}m}{1 \bullet 10^{-5}m} = 0.0523\,rad$$

קוטר הטבעת השחורה הראשונה הוא:

$$d_1 = L \bullet \alpha_2 = 1m \bullet 0.0523 = 0.0523m$$

8. על פי קריטריון רילי, הערך הזוויתי המינימלי בין שני המקורות, עבורו ניתן לראות אותם בנפרד הוא:

$$\alpha_{min} = \frac{1.2 \bullet \lambda}{a} = \frac{1.2 \bullet 4.36 \bullet 10^{-7}m}{1 \bullet 10^{-5}m} = 0.0523\,rad$$

9. בהתאם לקריטריון רילי, כושר ההפרדה של העין לגל האור, שאורכו 550nm הוא:

$$\alpha_{min} = \frac{1.2\lambda}{d_{\text{אישון}}} = \frac{1.2 \bullet 5.5 \bullet 10^{-7}m}{2 \bullet 10^{-3}m} = 3.3 \bullet 10^{-4} \text{ rad}$$

כלומר, ממרחק הראיה הקרובה (L_0=25cm) עין יכולה להבדיל בין שתי נקודות,

שהמרחק ביניהן הוא:

$$L_{min} = L_0 \bullet \alpha_{min} = 0.25m \bullet 3.3 \bullet 10^{-4} = 8.28 \bullet 10^{-5}m \approx 0.083mm$$

10. בתרגיל 5 מסדרה 13 נתקבל ביטוי עבור מרחק בין פסים שחורים:

$$\Delta l = \frac{\lambda}{2\alpha_{\text{מערכת}}}$$

הערך הזוויתי של המרחק בין הפסים לא יכול להיות גדול מכושר ההפרדה של העין,

דהיינו:

$$\frac{\Delta l}{L_0} = \frac{\lambda}{2\alpha_{\text{מערכת}} \bullet L_0} \geq \frac{1.2\lambda}{d_{\text{אישון}}}$$

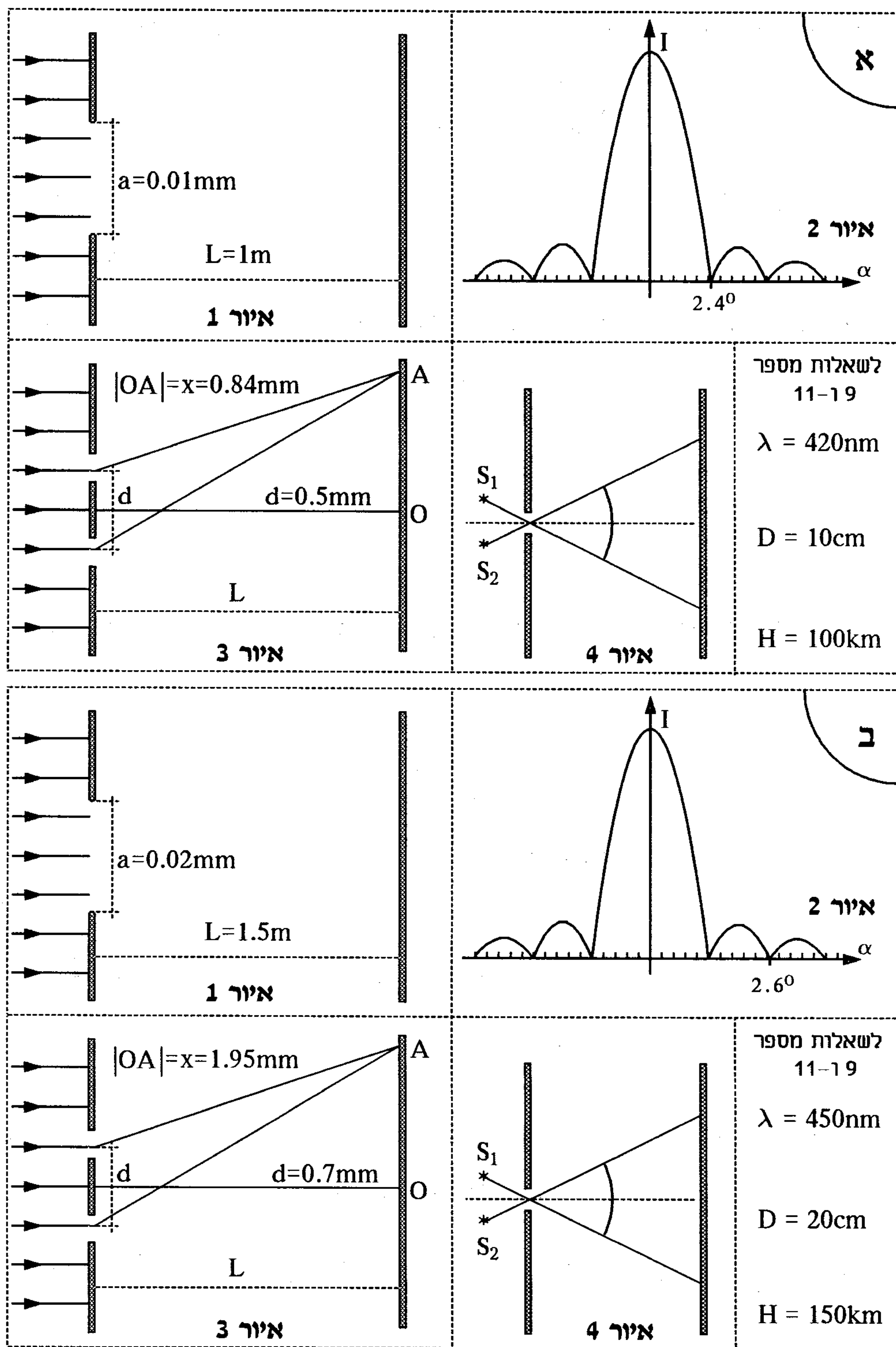
מהביטוי האחרון נובע, שהערך המקסימלי של הזווית בין שתי הלוחיות הוא:

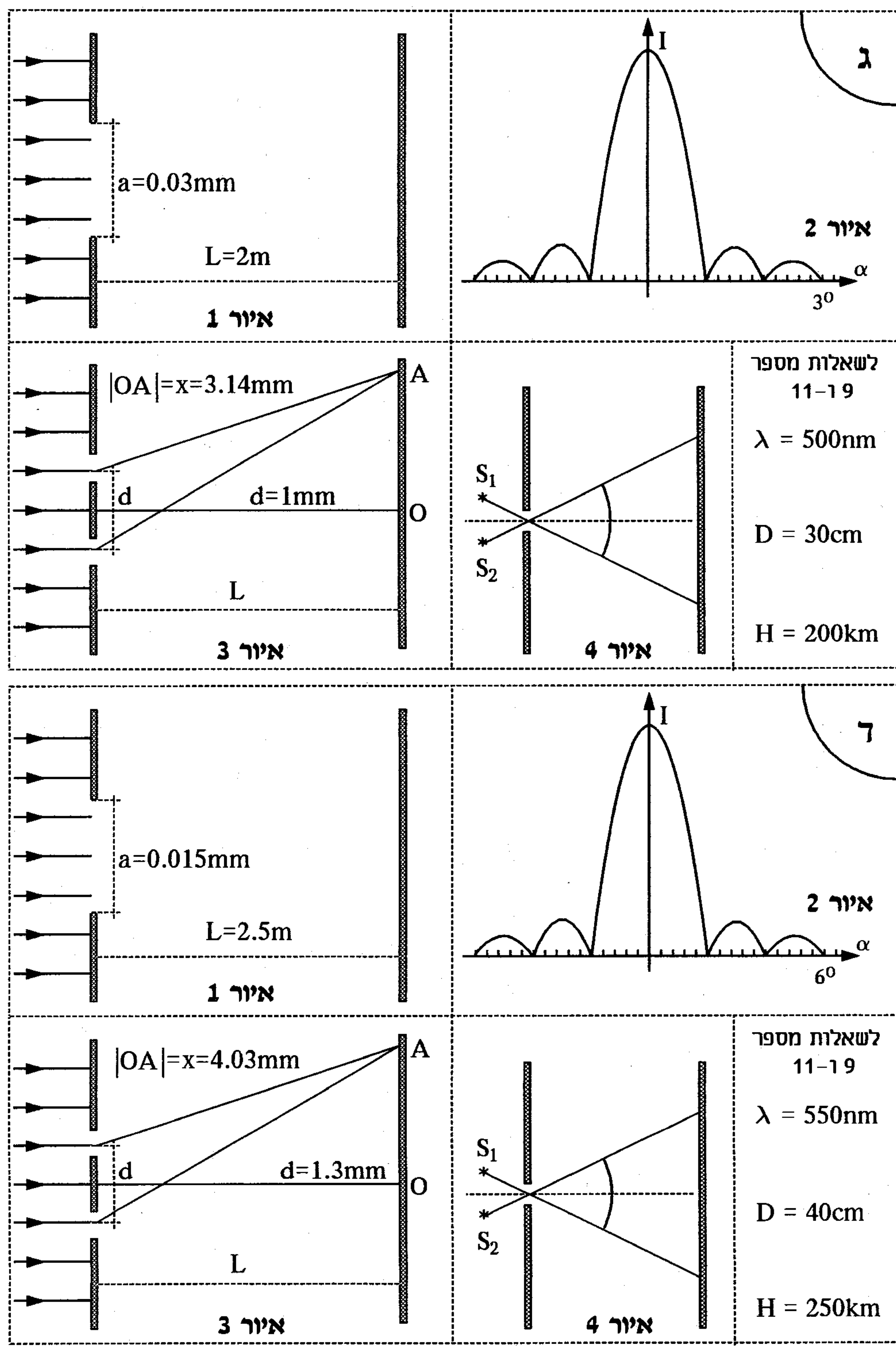
$$\alpha_{\text{מערכת}} = \frac{d_{\text{אישון}}}{2.4 \bullet L_0} = \frac{2 \bullet 10^{-3}m}{2.4 \bullet 0.25m} = 3.33 \bullet 10^{-3} \text{rad } (11.5')$$

11. לראיה ברורה של גוף הנמצא על פני כדור הארץ, המידה הזוויתית של הגוף

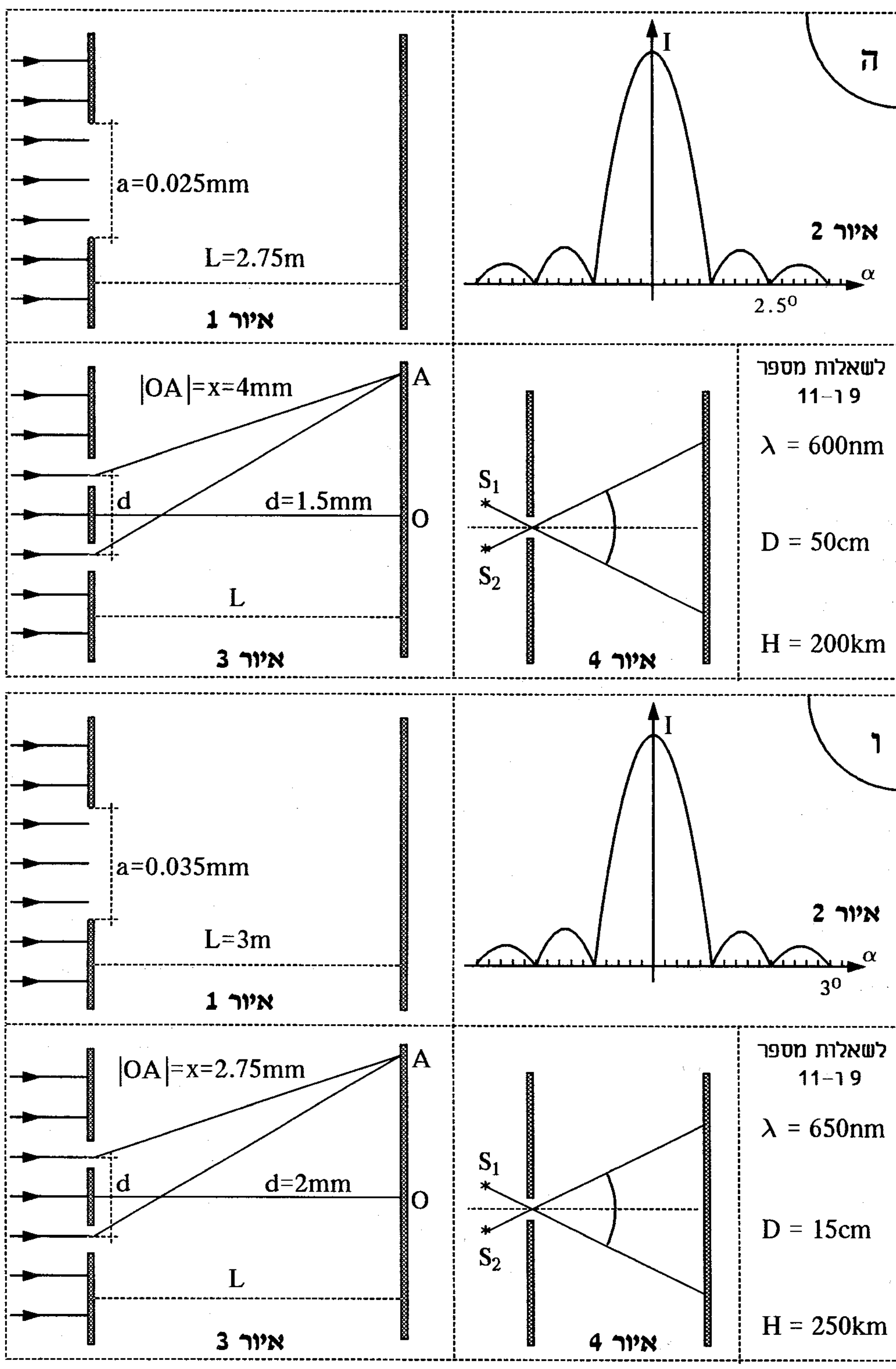
צריכה להיות לא קטנה מכושר ההפרדה של עדשת המצלמה, כלומר:

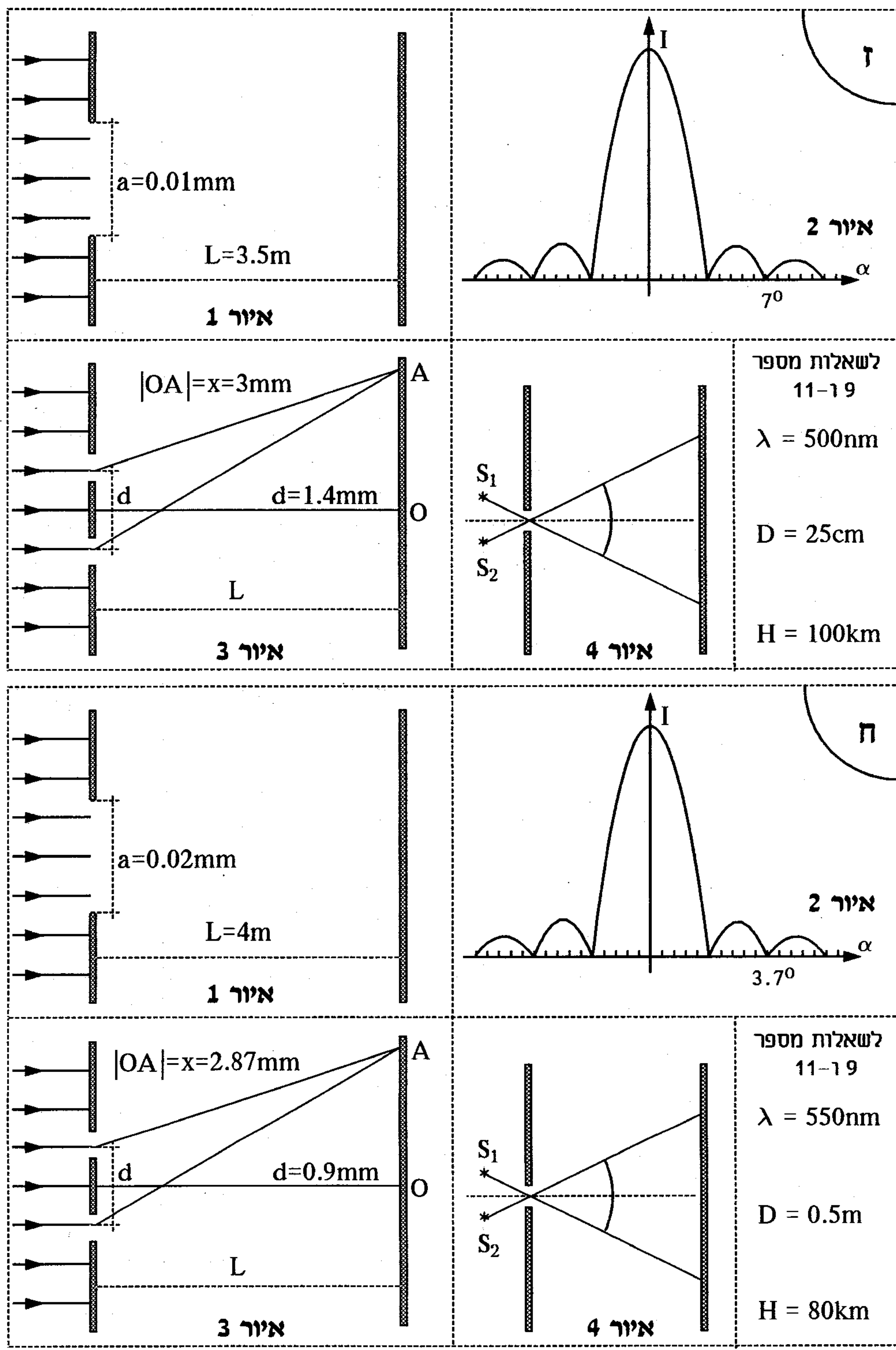
$$\frac{d_{\text{גוף}}}{H} \geq \frac{1.2\lambda}{D} \Longrightarrow d_{\text{גוף}} \geq \frac{1.2 \bullet \lambda \bullet H}{D} = \frac{1.2 \bullet 5.5 \bullet 10^{-7}m \bullet 2 \bullet 10^{5}m}{0.5m} \approx 0.26m$$


א
a=0.01mm
L=1m
איור 1
I
איור 2
α
2.4°
|OA|=x=0.84mm
A
d
d=0.5mm
O
L
איור 3
S_1
S_2
איור 4
לשאלות מספר
9 ו-11
λ = 420nm
D = 10cm
H = 100km
ב
a=0.02mm
L=1.5m
איור 1
I
איור 2
α
2.6°
|OA|=x=1.95mm
A
d
d=0.7mm
O
L
איור 3
S_1
S_2
איור 4
לשאלות מספר
9 ו-11
λ = 450nm
D = 20cm
H = 150km



ג
a=0.03mm
L=2m
איור 1
I
איור 2
α
3°
|OA|=x=3.14mm
A
d
d=1mm
O
L
איור 3
S1
S2
איור 4
לשאלות מספר
9 ו-11
λ = 500nm
D = 30cm
H = 200km
ד
a=0.015mm
L=2.5m
איור 1
I
איור 2
α
6°
|OA|=x=4.03mm
A
d
d=1.3mm
O
L
איור 3
S1
S2
איור 4
לשאלות מספר
9 ו-11
λ = 550nm
D = 40cm
H = 250km


ה
a=0.025mm
L=2.75m
איור 1
I
α
2.5⁰
איור 2
|OA|=x=4mm
A
d
d=1.5mm
O
L
איור 3
S1
S2
איור 4
לשאלות מספר
9 ו-11
λ = 600nm
D = 50cm
H = 200km
ו
a=0.035mm
L=3m
איור 1
I
α
3⁰
איור 2
|OA|=x=2.75mm
A
d
d=2mm
O
L
איור 3
S1
S2
איור 4
לשאלות מספר
9 ו-11
λ = 650nm
D = 15cm
H = 250km


ז
a=0.01mm
L=3.5m
איור 1
I
איור 2
α
7°
|OA|=x=3mm
A
d
d=1.4mm
O
L
איור 3
S1
S2
איור 4
לשאלות מספר
9 ו-11
λ = 500nm
D = 25cm
H = 100km
ח
a=0.02mm
L=4m
איור 1
I
איור 2
α
3.7°
|OA|=x=2.87mm
A
d
d=0.9mm
O
L
איור 3
S1
S2
איור 4
לשאלות מספר
9 ו-11
λ = 550nm
D = 0.5m
H = 80km

דף תשובות לסדרה "גלים אלקטרומגנטיים. עקיפת האור".

	א	ב	ג	ד	ה	ו	ז	ח
λ nm	419	454	524	524	545	611	611	646
α_0	4.8^0	2.6^0	2^0	4^0	2.5^0	2^0	7^0	3.7^0
x_0 cm	8.40	6.80	6.98	17.5	12.0	10.5	42.8	25.8
α_1 rad	0.063	0.034	0.026	0.052	0.033	0.026	0.091	0.048
x_1 cm	6.30	5.10	5.20	13.0	9.00	7.80	31.9	19.2
k	1	2	3	4	4	3	2	1
α_2 rad	0.050	0.027	0.021	0.042	0.026	0.021	0.073	0.039
d_1 cm	5.0	4.10	4.20	10.5	7.20	6.28	25.7	15.5
α_m rad	0.050	0.027	0.021	0.042	0.026	0.021	0.073	0.039
L_m 10^{-6} m	63.0	67.5	75.0	82.5	90.0	97.5	75.0	82.5
α_N	11.5′	11.5′	11.5′	11.5′	11.5′	11.5′	11.5′	11.5′
$d_{ג}$ cm	50.4	40.5	40.0	41.3	28.8	130	24.0	10.5

15. גלים אלקטרומגנטיים. סריג עקיפה.

מושגים ונוסחאות עיקריים.

סריג עקיפה - מספר גדול של פתחים זעירים, המרוכזים במרחב מוגבל, שעליהם מתרחשת תופעת עקיפת האור. במקרה הפשוט, סריג עקיפה מהווה אוסף סדקים מלבניים המקבילים ביניהם.

קבוע הסריג:

b - המרחק בין הסדקים

a - רוחב הסדק

$$d = a+b \quad (1)$$

ספקטרום של עקיפה - פס צבעוני המורכב משבעה צבעים (סגול, אינדיגו, כחול, ירוק, צהוב, כתום, אדום) המתקבל כתוצאה של עקיפת אור לא מונוכרומטי בסריג עקיפה. המקסימום המרכזי בעקיפה נשאר לבן.

תנאי לקבלת מקסימום בסריג עקיפה:

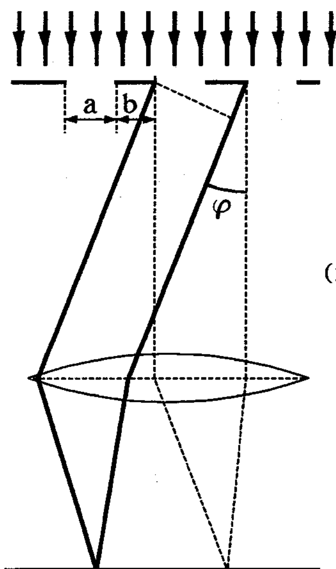
d - קבוע הסריג

φ - זווית בה נצפה מקסימום

λ - אורך הגל

k - סדר הספקטרום

$$d\sin\varphi = k\lambda \quad (2)$$



סריג עקיפה

<u>תנאי לקבלת מינימום בסריג עקיפה:</u>

d - קבוע הסריג

φ - זווית בה נצפה מינימום

$$b\sin\varphi = k\lambda \qquad (3)$$

λ - אורך הגל

k - סדר הספקטרום

<u>כושר הפרדה ספקטרלית של סריג עקיפה</u> - יכולת להפריד בין שתי קרינות בעלות אורכי גלים קרובים:

N - מספר הסדקים בסריג

$$\frac{\bar{\lambda}}{\Delta\lambda} = N \bullet k \qquad (4)$$

k - סדר הספקטרום

$\Delta\lambda$ - הפרש אורכי הגלים

$\bar{\lambda}$ - ממוצע חשבוני של אורכי הגלים

<u>סדר מקסימלי של סריג עקיפה:</u>

d - קבוע הסריג

$$k_{max} = \frac{d}{\lambda} \qquad (5)$$

λ - אורך הגל

<u>כושר הפרדה מקסימלי של סריג עקיפה:</u>

N - מספר הסדקים בסריג

$$N \bullet k_{max} = \frac{Nd}{\lambda} = \frac{L}{\lambda} \qquad (6)$$

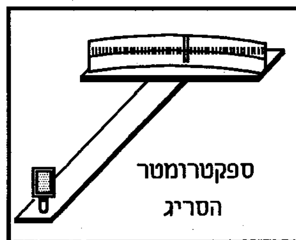
d - קבוע הסריג

λ - אורך הגל

L - אורך הסריג

בעיה

תלמיד מבצע מספר ניסויים בספקטרומטר הסריג במטרה ללמוד את הספקטרומים של מקורות אור שונים.



מרחק סריג העקיפה מהחריץ בסרגל הוא 57.3 סנטימטר, קבוע הסריג d, מספר הסדקים N.

שאלות

1. בניסוי עם מנורה עם חוט להט, תלמיד קיבל בספקטרום מסדר ראשון מרחק החריץ x מפס הצבעוני (ראה איור 1).

א) קבע את אורך הגל.

ב) חשב את הפרש הדרכים.

2. חשב את הרוחב הזוויתי של הספקטרום הראשון ($\lambda_{\text{אדום}}=700nm$, $\lambda_{\text{סגול}}=400nm$).

3. חשב את סדר הספקטרום המקסימלי של הסריג.

---

4. סריג עקיפה מוקרן באור לא מונוכרומטי. המקסימום לגל אחד (λ_1) מסדר k מתלכד עם המקסימום של הגל השני (λ_2) מסדר $k+1$. חשב את אורך הגל השני.

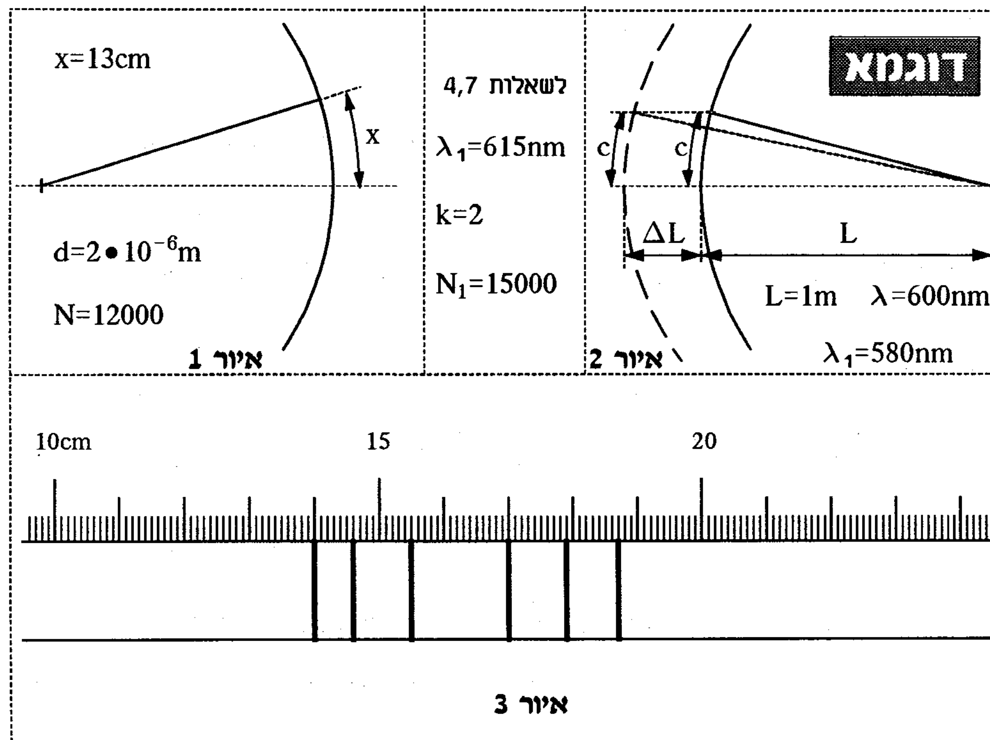
5. סריג עקיפה מוקרן באור, שאורך הגל שלו λ. מחליפים את המקור למקור אחר (אורך הגל λ_1). חשב, לאיזה מרחק יש להזיז את המסך, כדי שהמיקום של פס האור הראשון יישאר באותו מקום על המסך (איור 2).

6. באיור 3 מובא ציור של חלק מהספקטרום מסדר ראשון שנוצר על ידי סריג העקיפה הנתון ואשר מוקרן באור של מנורה המלאה בגז או באדים של חומר.

א) זהה באיזה גז (אדים) מילו את המנורה (העזר בטבלה שבסוף הסדרה).

ב) בחר בטבלה שבסוף הסדרה שני קווים כך שאורכי הגלים שלהם קרובים ביותר, ובדוק אם ניתן להפריד בין שני הקווים האלה בעזרת הסריג הנתון.

7. מחליפים את הסריג הנתון בסריג אחר בעל אותו קבוע הסריג ומספר סדקים N_1. קבע, פי כמה תשתנה אינטנסיביות האור בנקודת המקסימום ?



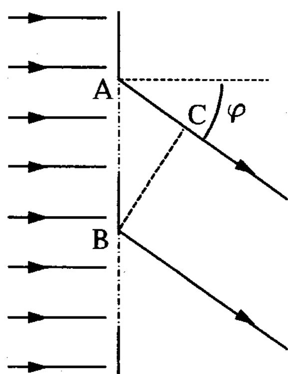
פתרון

1. א) מרחק סריג העקיפה מהסרגל בספקטרומטר הסריג נבחר כך, שאורך הקשת בעלת הערך הזוויתי של מעלה אחת הוא סנטימטר אחד:

$$l_0 = \frac{2\pi R}{360^0} = \frac{2 \bullet 3.14 \bullet 0.573\text{m}}{360^0} = 0.01\frac{\text{m}}{\text{deg}}$$

כלומר, מרחק המקסימום מהחריץ (בסנטימטרים) שווה מספרית לערך הזווית (במעלות) בה מתקבל המקסימום הנ"ל. לפי נתוני הבעיה, מרחק המקסימום הראשון מהחריץ הוא 13 ס"מ. לכן הזווית בה מתקבל המקסימום הנ"ל היא 13^0. בהתאם לנוסחה (2), אורך הגל המבוקש הוא:

$$\lambda = \frac{d \bullet \sin\varphi}{k} = \frac{2 \bullet 10^{-6}\text{m} \bullet \sin 13^0}{1} = 4.5 \bullet 10^{-7}\text{m} = 450\text{nm}$$



ב) מהמשולש ABC מקבלים שהפרש הדרכים הוא:

$$\Delta=|AC|=|AB|\bullet\sin(\angle CBA)$$

מאחר והזווית CBA שווה לזווית φ (ערכה של זווית φ

נקבע בשאלה 1), נקבל עבור Δ:

$$\Delta = |AC|=|AB|\bullet\sin\varphi = d\bullet\sin\varphi = 2\bullet10^{-6}m\bullet\sin13^0 = 4.5\bullet10^{-7}m$$

2. לחישוב הערך הזוויתי של הספקטרום הראשון, נקבע בעזרת נוסחה (2) את הזוויות בהן מתקבלים המקסימומים לאור אדום ולאור סגול:

$$\varphi_{\text{אדום}} = \arcsin\frac{k\bullet\lambda_{\text{אדום}}}{d} = \arcsin\frac{1\bullet7\bullet10^{-7}m}{2\bullet10^{-6}m} = 20.49^0$$

$$\varphi_{\text{סגול}} = \arcsin\frac{k\bullet\lambda_{\text{סגול}}}{d} = \arcsin\frac{1\bullet4\bullet10^{-7}m}{2\bullet10^{-6}m} = 11.54^0$$

הערך הזוויתי של הספקטרום הראשון הוא:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{אדום}} - \varphi_{\text{סגול}} = 8.95^0$$

3. את סדר הספקטרום המקסימלי לסריג הנתון ניתן לקבוע לפי נוסחה (5):

$$k_{max} = \frac{d}{\lambda} = \frac{2\bullet10^{-6}m}{7\bullet10^{-7}m} = 2.86$$

מספר הספקטרומים, שניתן לראות באופן מלא בעזרת הסריג הוא 2.

4. על פי הנוסחה (2) הזוויות בהן מתקבל מקסימום מסדר k עבור גל שאורכו λ_1

ומקסימום מסדר $k+1$ עבור גל שאורכו λ_2 הן:

$$\varphi_k = \arcsin\frac{k \bullet \lambda_1}{d}$$

$$\varphi_{k+1} = \arcsin\frac{(k+1) \bullet \lambda_2}{d}$$

לפי תנאיי הבעיה $\varphi_k = \varphi_{k+1}$. מכאן:

$$\arcsin\frac{(k+1) \bullet \lambda_2}{d} = \arcsin\frac{k \bullet \lambda_1}{d} \quad \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow (k+1) \bullet \lambda_2 = k \bullet \lambda_1 \Longrightarrow \lambda_2 = \frac{k}{k+1} \bullet \lambda_1$$

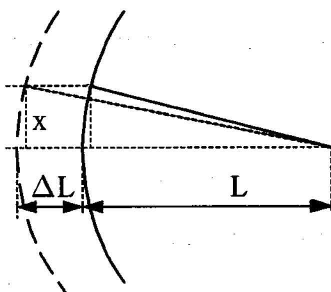
הצבת הנתונים בשיווין האחרון נותנת את האורך הגל המבוקש:

$$\lambda_2 = \frac{k}{k+1} \bullet \lambda_1 = \frac{2}{2+1} \bullet 615\text{nm} = 410\text{nm}$$

5. נרשום את התנאי לקבלת מקסימום מסדר k עבור שני מצבים:

א) סריג מוקרן באור שאורכו λ: $\quad d\sin\varphi_1 = k \bullet \lambda$

ב) סריג מוקרן באור שאורכו λ_2: $\quad d\sin\varphi_2 = k \bullet \lambda_1$



מרחק נקודת המקסימום מהציר בשני המקרים הוא:

$$x = L \bullet \tan\varphi_1 = (L+\Delta L) \bullet \tan\varphi_2$$

מאחר והזוויות קטנות, מהשיוויונות לעיל נקבל:

$$\frac{Lk\lambda}{d} = \frac{(L+\Delta L)k\lambda_1}{d} \Longrightarrow \Delta L = \frac{L(\lambda-\lambda_1)}{\lambda_1} = \frac{1\text{m} \bullet (600-580)\text{nm}}{580\text{nm}} = 0.034\text{m}$$

6. א) נבחר בקו השמאלי:

* מרחק הקו הנ"ל מהחריץ הוא 14 ס"מ. כלומר, זווית סטיית המקסימום המתאים היא 14 מעלות (ראה הסבר לשאלה 1).
* על פי הנוסחה (2), אורך הגל המתאים לקו הנבחר הוא:

$$\lambda = \frac{d \bullet \sin\varphi}{k} = \frac{2 \bullet 10^{-6} m \bullet \sin 14^0}{1} = 4.84 \bullet 10^{-7} m$$

באופן דומה נבצע את החישובים לשאר הקווים ונרשום את התוצאות בטבלה:

מרחק	זווית (^{0})	אורך הגל (nm)
14	14	484
14.6	14.6	504
15.5	15.5	534
17	17	585
17.9	17.9	615
18.7	18.7	641

השוואת נתוני הטבלה שנתקבלה לטבלה "אורכי הגלים בספקטרומים" מראה שהגז הנמצא במנורה הוא נאון.

ב) מהטבלה "אורכי הגלים בספקטרומים" ניתן לראות, ששני אורכי הגלים הקרובים ביותר הם 540nm ו-533nm, הפרש אורכי הגלים הוא 7nm. נעזר בנוסחה (4) ונחשב, את הפרש האורכי הגלים המינימלי עבורו ניתן לראות את הקווים בנפרד:

$$\Delta\lambda = \frac{\bar{\lambda}}{N \bullet k} = \frac{\frac{533nm+540nm}{2}}{12000 \bullet 1} = 0.04nm$$

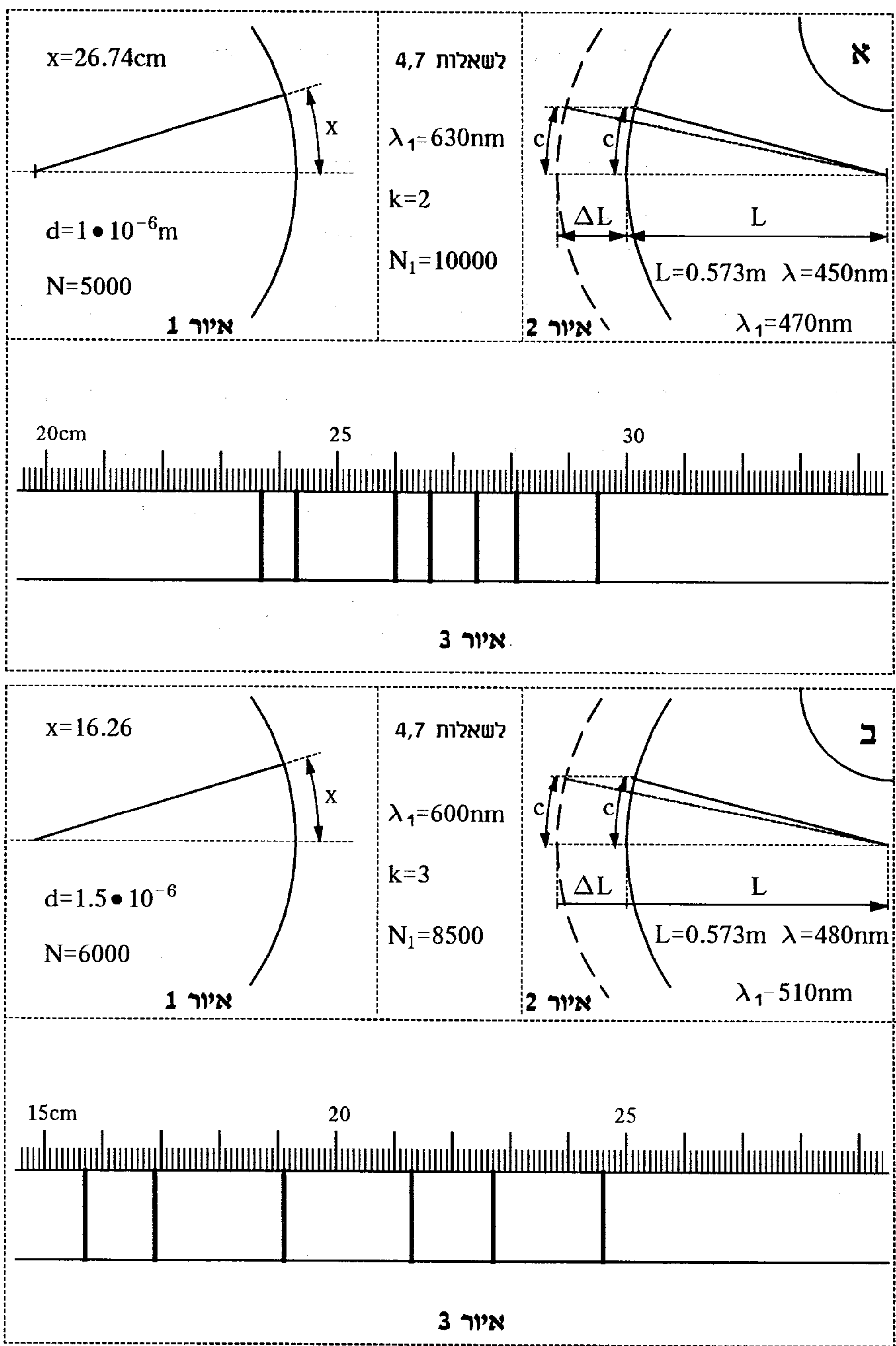
כלומר, ניתן להבחין בין שני הקווים הנ"ל בעזרת סריג עקיפה הנתון.

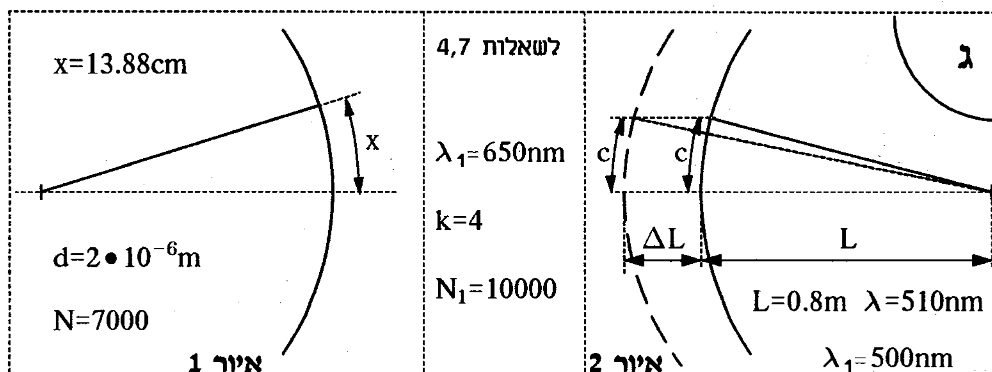
7. מאחר ומספר הסדקים N_1 גדול מ-N, רוחב סריג העקיפה החדש גדול מרוחב הסריג הנתון, ואנרגיית האור הנכנסת לסריג החדש תהיה פי $n=\frac{N_1}{N}$ גדולה יותר.

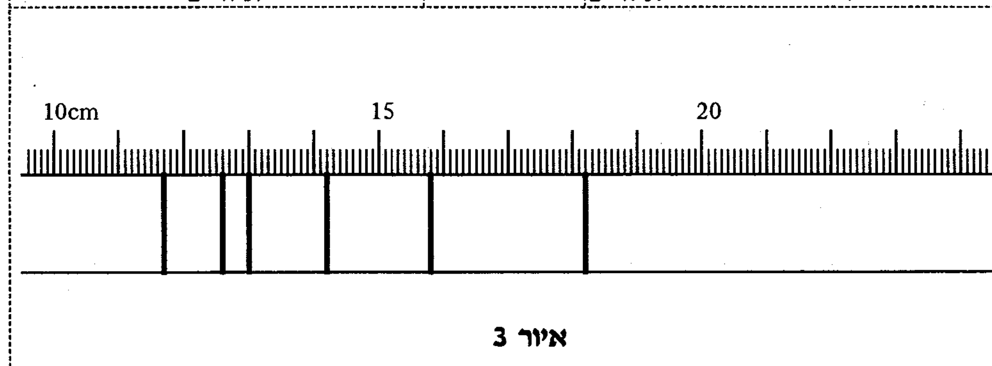
מאידך, רוחבו של כל מקסימום עומד ביחס הפוך למספר הכולל של סדקים בסריג.

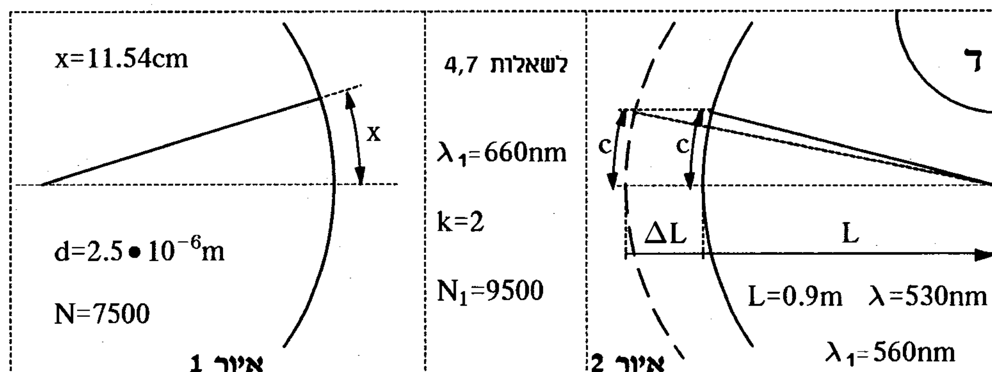
מכאן נובע שמקסימומים הנוצרים על ידי הסריג החדש הם צרים פי $n=\frac{N_1}{N}$. אנרגיה גדולה יותר פי n מגיעה לשטח קטן יותר פי n, ואינטנסיביות האור תגדל פי n^2 (ראה נוסחה (2) מסדרה 10, עמוד 131) כאשר:

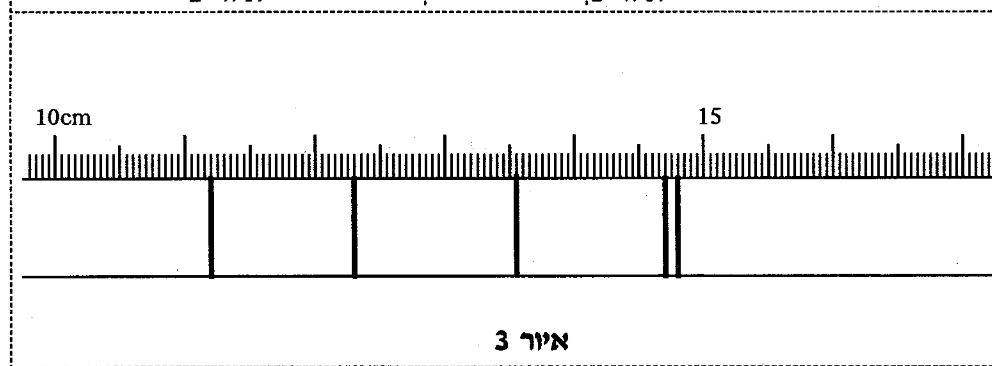
$$n^2 = (\frac{N_1}{N})^2 = (\frac{15000}{12000})^2 = 1.56$$

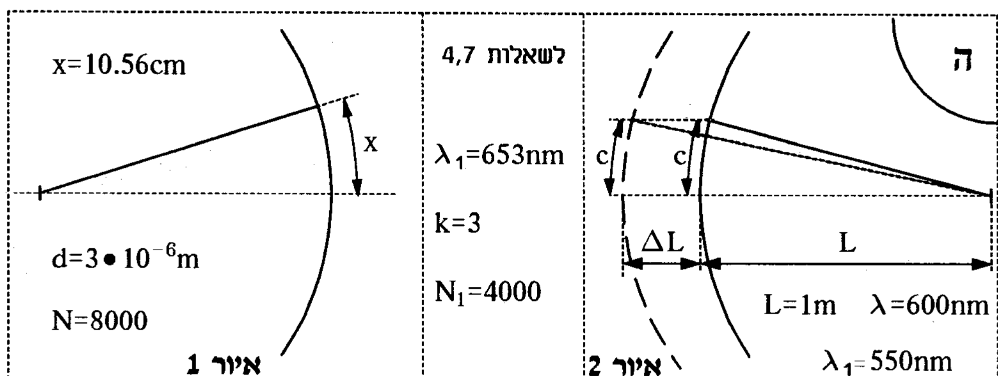

א
x=26.74cm
x
d=1•10⁻⁶m
N=5000
איור 1
לשאלות 4,7
λ1=630nm
k=2
N1=10000
c
c
ΔL
L
L=0.573m λ=450nm
λ1=470nm
איור 2
20cm
25
30
איור 3
ב
x=16.26
x
d=1.5•10⁻⁶
N=6000
איור 1
לשאלות 4,7
λ1=600nm
k=3
N1=8500
c
c
ΔL
L
L=0.573m λ=480nm
λ1=510nm
איור 2
15cm
20
25
איור 3

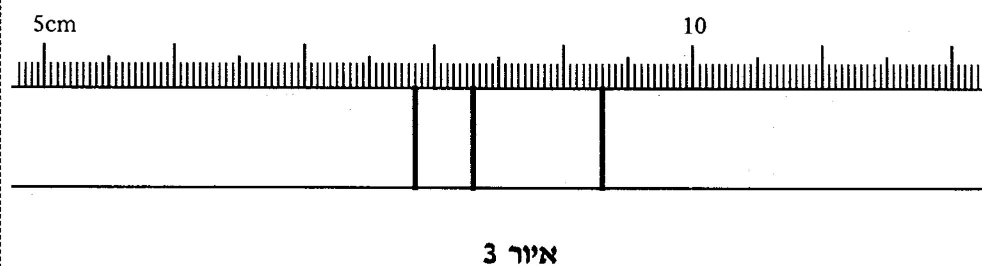

x=13.88cm
x
d=2 • 10⁻⁶m
N=7000
איור 1
לשאלות 4,7
λ₁=650nm
k=4
N₁=10000
ג
c
c
ΔL
L
L=0.8m λ=510nm
איור 2
λ₁=500nm


10cm
15
20
איור 3

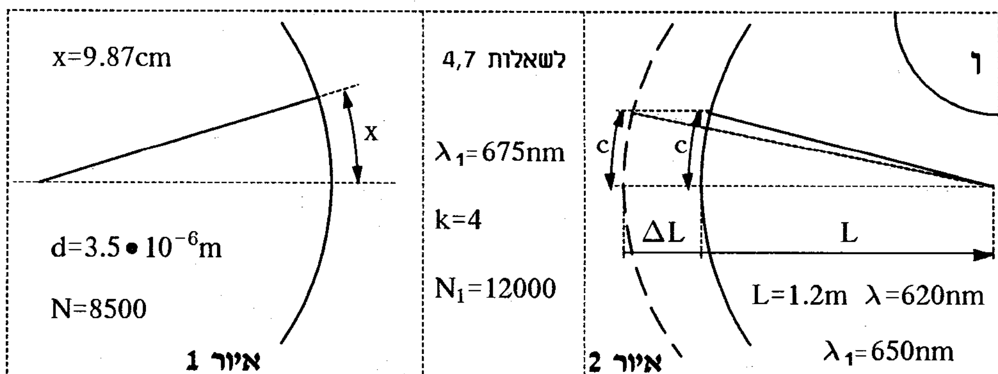

x=11.54cm
x
d=2.5 • 10⁻⁶m
N=7500
איור 1
לשאלות 4,7
λ₁=660nm
k=2
N₁=9500
ד
c
c
ΔL
L
L=0.9m λ=530nm
איור 2
λ₁=560nm

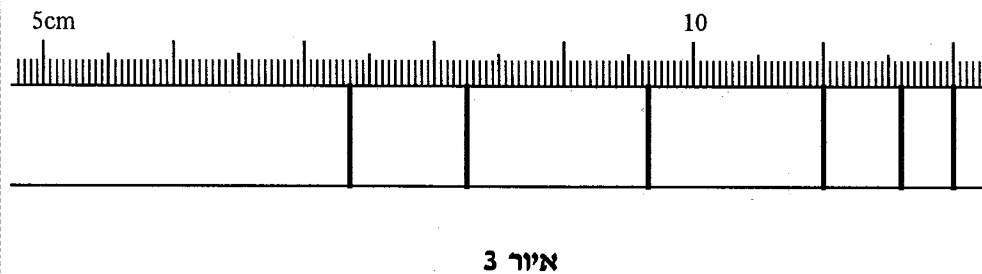

10cm
15
איור 3


x=10.56cm
x
d=3 • 10⁻⁶m
N=8000
איור 1
לשאלות 4,7
λ₁=653nm
k=3
N₁=4000
ה
c
c
ΔL
L
L=1m λ=600nm
λ₁=550nm
איור 2


5cm
10

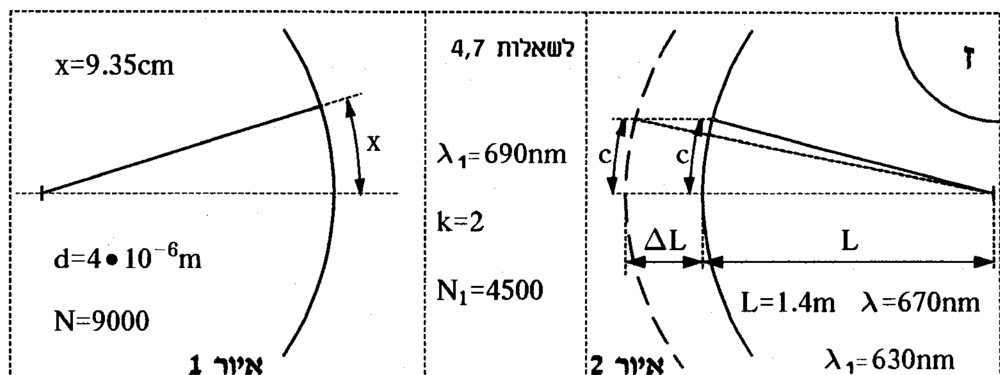
איור 3

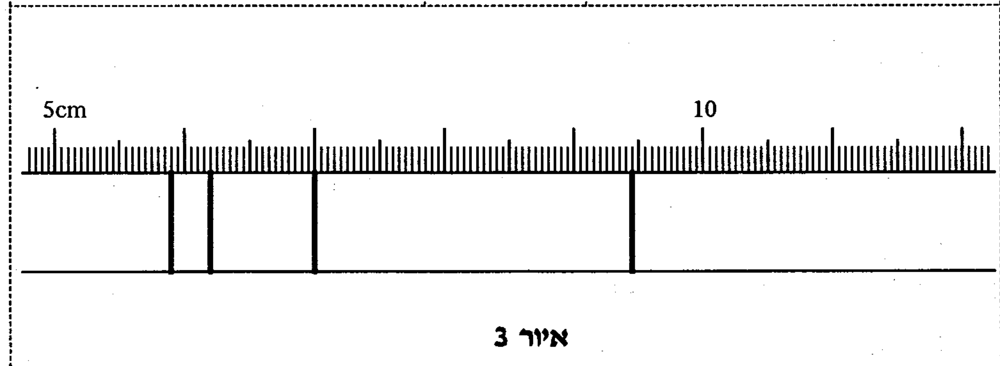

x=9.87cm
x
d=3.5 • 10⁻⁶m
N=8500
איור 1
לשאלות 4,7
λ₁=675nm
k=4
N₁=12000
ו
c
c
ΔL
L
L=1.2m λ=620nm
λ₁=650nm
איור 2


5cm
10

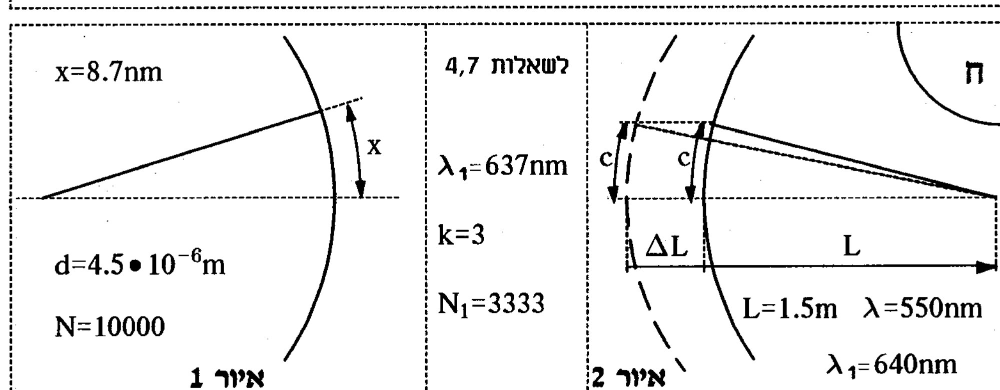
איור 3

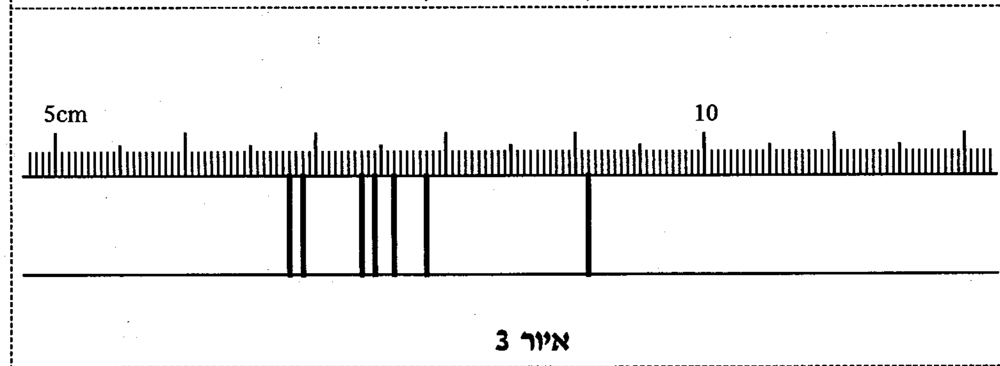
ז


x=9.35cm
x
d=4•10⁻⁶m
N=9000
איור 1
לשאלות 4,7
λ₁=690nm
k=2
N₁=4500
c
c
ΔL
L
L=1.4m λ=670nm
λ₁=630nm
איור 2


5cm
10
איור 3

ח


x=8.7nm
x
d=4.5•10⁻⁶m
N=10000
איור 1
לשאלות 4,7
λ₁=637nm
k=3
N₁=3333
c
c
ΔL
L
L=1.5m λ=550nm
λ₁=640nm
איור 2


5cm
10
איור 3

"אורכי הגלים בספקטרומים"

יסוד	צבע הקו	אורך הגל (nm)	יסוד	צבע הקו	אורך הגל (nm)
	אדום	656.3		אדום	623.4
	ירוק	486.1		צהוב	578.0
מימן	אינדיגו	434.0	כספית	ירוק	546.0
	סגול	410.2		כחול	491.6
	סגול	397.0		אינדיגו	435.8
				סגול	406.2
	אדום	640.2		אדום	728.1
	כתום	614.3		אדום	706.5
	כתום	594.5		אדום	667.8
	צהוב	585.2		צהוב	587.6
נאון	ירוק	576.0	הליום	ירוק	501.6
	ירוק	540.0		ירוק	492.2
	ירוק	533.0		כחול	471.3
	ירוק	503.1		אינדיגו	447.1
	אינדיגו	484.9		אינדיגו	438.8
				סגול	412.1
				סגול	402.6

דף תשובות לסדרה " גלים אלקטרומגנטיים. סריג עקיפה".

	λ nm	Δ nm	$\Delta\varphi$	k	λ nm	ΔL cm	יסוד	$\Delta\lambda_{min}$ nm	n^2
א	450	450	20.8^0	1	420	-2.4	**הליום**	0.09	4
ב	420	420	12.3^0	2	450	-3.4	**כספית**	0.07	2
ג	480	480	8.95^0	2	520	1.6	**כספית**	0.06	2
ד	500	500	7.05	3	440	-4.8	**נאון**	0.07	1.6
ה	550	550	5.83	4	490	9.0	**מימן**	0.05	0.25
ו	600	600	4.97^0	5	540	-5.5	**הליום**	0.05	2
ז	650	650	4.34^0	5	460	8.9	**מימן**	0.04	0.25
ח	680	680	3.85^0	6	478	-21	**נאון**	0.05	0.11